

# СОДЕРЖАНИЕ

---

Номер 7, 2021

---

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

### Плодородие почв

Изменение фракционного состава минеральных фосфатов, содержания подвижного фосфора и степени подвижности фосфатов по профилю дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений

*М. Т. Васбиева*

3

Агрогенная эволюция дерново-подзолистой глееватой глинистой почвы (Albic retisols) с регулируемым водно-воздушным режимом

*А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, В. М. Буре*

13

### Удобрения

Вклад минеральных удобрений в формирование урожайности полевых культур. Сообщение 1. Азотные удобрения

*С. А. Шафран*

27

Влияние минеральных удобрений и погодных условий на урожайность яровой пшеницы и окупаемость удобрений в длительном стационарном опыте

*А. Г. Дзюин*

36

Эффективность применения удобрения Вуксал Макромикс для некорневой подкормки кукурузы

*В. Н. Багринцева, И. А. Шмалько*

47

### Агроэкология

Агроэкологическое состояние почвенного покрова на территории железорудных месторождений Курской магнитной аномалии

*А. И. Стифеев, О. В. Никитина, В. И. Лазарев, Р. А. Зиновьев*

57

Биоэкологическое значение педобионтов в трансформации органического материала почв

*П. Г. Витион*

64

### Экотоксикология

Кобальт в системе почва—растение на подзолистых почвах Европейского Северо-Востока России

*Г. Я. Елькина*

75

Оценка и нормирование экологического состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами

*И. О. Плеханова, О. А. Золотарева*

83

### ЮБИЛЕИ

К 65-летию А.Л. Иванова

95

---

# Contents

---

No. 7, 2021

---

## EXPERIMENTAL ARTICLES

### Soil Fertility

Changes in the Fractional Composition of Mineral Phosphates, Content of Mobile Phosphorus and Degree of Mobility of Phosphates along the Profile of Sod-Podzolic Soil of Long-Term Application of Fertilizers

*M. T. Vashieva* 3

Agrogenic Evolution of Sod-Podzolic Surface-Moistened Clay Soil (Albic retisols) with Adjustable Water-Air Mode

*A. V. Litvinovich, A. V. Lavrishchev, V. M. Bure* 13

### Fertilizers

Contribution of Mineral Fertilizers to the Formation of the Yield of Field Crops. Message 1. Nitrogen Fertilizers

*S. A. Shafran* 27

Influence of Mineral Fertilizers and Weather Conditions on the Yield of Spring Wheat and the Payback of Fertilizers in a Long-Term Stationary Experiment

*A. G. Dzyuin* 36

Efficiency of Application of Agrochemical Vuksal Macromix for Foliar Feeding of Corn

*V. N. Bagrintseva, I. A. Shmalko* 47

### Agroecology

Agroecological State of the Soil Cover on the Territory of Iron Ore Deposits of the Kursk magnetic anomaly

*A. I. Stifeev, O. V. Nikitin, V. I. Lazarev, R. A. Zinoviev* 57

Bioecological Significance of Pedobionts in the Transformation of Soil Organic Material

*P. G. Vition* 64

### Ecotoxicology

Cobalt in the Soil-Plant System on Podzolic Soils of the European North-East of Russia

*G. Ya. Elkina* 75

Assessment and Regulation of the Ecological State of Soils Contaminated with Heavy Metals

*I. O. Plekhanova, O. A. Zolotareva* 83

## ANNIVERSARIES

To the 65<sup>th</sup> anniversary of A.L. Ivanov 95

---

## ИЗМЕНЕНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА МИНЕРАЛЬНЫХ ФОСФАТОВ, СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНОГО ФОСФОРА И СТЕПЕНИ ПОДВИЖНОСТИ ФОСФАТОВ ПО ПРОФИЛЮ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

© 2021 г. М. Т. Васбиева

*Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства  
Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН  
614532 с. Лобаново, Пермский район, Пермский край, ул. Культуры, 12, Россия*

*E-mail: vasbievamt15@gmail.com*

Поступила в редакцию 23.10.2020 г.

После доработки 03.03.2021 г.

Принята к публикации 10.04.2021 г.

Изучено влияние применения органических (навоз КРС, осадки сточных вод (*ОСВ*)) и минеральных удобрений на фракционный состав минеральных фосфатов (метод Гинзбург–Лебедевой), содержание подвижного фосфора и степень подвижности фосфатов в дерново-подзолистой тяжело-суглинистой почве. Исследования проведены в условиях длительного стационарного опыта, заложенного в 1976 г., в 1-метровом слое почвы. Установлено, что внесение *ОСВ* достоверно повысило в пахотном горизонте почвы содержание всех фракций фосфатов в 1.2–1.6 раза. Увеличение содержания фосфатов кальция наблюдали до глубины 80 см, содержания алюмо- и железифосфатов – до 100 см. Применение навоза КРС в меньшей степени повлияло на минеральный состав фосфатов, чем *ОСВ*. Внесение НРК в течение 5-ти ротаций полевого 7-польного севооборота повысило в пахотном горизонте почвы содержание всех групп минеральных фосфатов в 1.4–3.6 раза. Отмечено увеличение фосфатов кальция по всему 1-метровому слою почвы, содержания Fe-P – в слое 0–40 см. Содержание Al-P с глубиной снизилось на 27–32%. Длительное внесение органических и минеральных удобрений оказало положительное влияние на содержание в почве подвижного фосфора и степень подвижности фосфатов. Отмечено существенное увеличение запасов подвижного фосфора в пахотном горизонте почвы и 1-метровом слое.

**Ключевые слова:** дерново-подзолистая почва, фракционный состав, минеральные фосфаты, подвижный фосфор, степень подвижности фосфатов, навоз, осадки сточных вод, минеральные удобрения.

**DOI:** 10.31857/S0002188121070115

### ВВЕДЕНИЕ

Фосфор является одним из наиболее важных и дефицитных элементов минерального питания растений. Хорошая обеспеченность фосфором при оптимальном соотношении с другими макро- и микроэлементами способствует получению высоких урожаев сельскохозяйственных культур и улучшению качества продукции. Недостаток доступных растениям форм фосфора в мире наблюдается на половине площадей почв сельскохозяйственного назначения на фоне истощения легкодоступных месторождений этого элемента [1, 2]. В Пермском крае, по данным государственного центра агрохимической службы “Пермский”, в 2019 г. площадь пахотных угодий с содержанием

подвижного фосфора <100 мг/кг составила 67% (очень низкое и низкое содержание (<50 мг/кг) – 34%, среднее (50–100 мг/кг) – 33%). Средневзвешенная обеспеченность фосфором >100 мг/кг отмечена только в 9-ти из 33-х районов края [3]. С 1996 г. в некоторых районах произошло уменьшение доли пашни с высоким и очень высоким содержанием в почве фосфора в 1.5–2.0 раза [4]. В отличие от азота в природе не существует естественных источников пополнения запаса фосфора в почве. Поэтому основной путь поддержания оптимального питания растений фосфором – внесение минеральных и органических удобрений. За последние 10 лет в Пермском крае насыщенность пашни органическими удобрениями

Таблица 1. Агрохимическая характеристика *ОСВ* и навоза (усредненные данные)

| Удобрение  | Влажность, % | рН <sub>KCl</sub> | С <sub>орг</sub>               | N <sub>общ</sub> | P <sub>общ</sub> | K <sub>общ</sub> |
|------------|--------------|-------------------|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|
|            |              |                   | % от абсолютно сухого вещества |                  |                  |                  |
| <i>ОСВ</i> | 68           | 6.5               | 64                             | 1.5              | 3.1              | 0.5              |
| Навоз      | 72           | 7.3               | 73                             | 1.5              | 2.2              | 1.0              |

составила 1.1 т/га, минеральными – 12.1 кг д.в., из них на долю фосфора пришлось от 20 (под зерновые) до 30% (под картофель). По сравнению с 1980–1990 гг. применение минеральных удобрений снизилось в 8–9 раз, органических – в 3–4 раза, объемы фосфоритования уменьшились в 21 раз.

Систематическое изучение применения удобрений в длительных стационарных опытах позволяет разработать механизм их рационального применения и обеспечить сохранение почвы, ее основных свойств как особого природного тела, имеющего исключительно важное значение в поддержании жизни на Земле.

Природные запасы фосфора в почве и их распределение по профилю определяется содержанием фосфора в материнской породе и характером почвообразовательного процесса. Фосфор уникален по количеству форм и соединений, в виде которых он содержится в почве. Процессы, происходящие между внесением удобрений и образованием конечных продуктов, зависят от множества факторов. Охарактеризовать фосфатный режим почвы в полной степени позволяет определение фракционного состава минеральных фосфатов, который отражает генетические особенности почвы и влияние длительного внесения удобрений на закрепление остаточных фосфатов минеральной частью почвы [5–7].

Цель работы – изучение группового состава минеральных фосфатов, содержания подвижного фосфора и степени подвижности фосфатов дерново-подзолистой почвы Предуралья по профилю и оценка степени влияния длительного применения удобрений на процессы накопления, миграции и трансформации соединений фосфора в почве.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на базе длительного стационарного опыта, заложенного в 1976 г. Схема опыта, варианты: 1 – контроль, 2 – навоз КРС, 3 – осадок сточных вод (*ОСВ*), 4 – НРК (фон), 5 – фон + навоз, 6 – фон + *ОСВ*. Почва опытного участка – дерново-мелкоподзолистая тяжелосуглинистая. Агрохимическая характеристика поч-

вы на момент закладки опыта была следующей: С<sub>орг</sub> – 1.28%, рН<sub>KCl</sub> – 4.8, H<sub>r</sub> – 3.7 и S – 18.1 смоль(экв)/кг, подвижный P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и обменный K<sub>2</sub>O (по Кирсанову) – 154 и 170 мг/кг.

Наблюдения проводили в полевом 7-польном севообороте с чередованием культур: чистый или занятый пар – озимая рожь – яровая пшеница с подсевом клевера – клевер 1-го года пользования (г.п.) – клевер 2-го г.п. – ячмень – овес. Органические удобрения вносили 1 раз в ротацию севооборота в пару. Осадки сточных вод натуральной влажности вносили в течение 1–5-й ротаций (1–2-я ротация – по 20 т/га, 3–5-я ротации – по 40 т/га). Вариант с навозом 40 т/га был введен с 3-й ротации севооборота. Минеральные удобрения (1-я ротация – N120P120K120, 2-я ротация – N90P90K90, 3–5-я ротации – N60P60K60) вносили под все зерновые культуры севооборота под предпосевную культивацию в виде N<sub>аа</sub> или N<sub>м</sub>, P<sub>с</sub>, P<sub>сд</sub> и K<sub>х</sub>. Повторность вариантов в опыте трехкратная, расположение делянок систематическое. Общая площадь делянки 47.5 м<sup>2</sup>. В опыте использовали *ОСВ* биологических очистных сооружений г. Перми. Агрохимическая характеристика *ОСВ* и навоза представлена в табл. 1. *ОСВ*, примененный в опыте, по агрохимическим показателям и содержанию ТМ соответствовал требованиям ГОСТ Р. 17.4.3.07-2001. *ОСВ* применяли после выдержки на иловых площадках не менее 3-х лет, в результате чего происходило его обеззараживание, и он соответствовал требуемым микробиологическим и паразитологическим показателям (СанПиН 2.1.7.573-96).

Для выполнения поставленной цели в конце 5-й ротации (2012–2013 гг.) осенью был проведен отбор почвенных образцов в 1-метровом слое почвы по слоям 0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 см. Групповой состав фосфатов почвы определяли по Гинзбург–Лебедевой [8], подвижный фосфор – по Кирсанову [9], степень подвижности фосфатов – по Карпинскому и Замятиной [10]. Лабораторные исследования проводили в воздушно-сухих образцах почвы. Статистическую обработку данных проводили, используя дисперсионный и корреляционный анализы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метод Гинзбург–Лебедевой позволяет выделить 5 фракций минеральных почвенных фосфатов: Al-P, Fe-P и 3 фракции фосфатов кальция (Ca-P<sub>I</sub>, Ca-P<sub>II</sub>, Ca-P<sub>III</sub>), различающихся по основности, степени окристаллизованности и, следовательно, по растворимости и доступности растениям: Ca-P<sub>I</sub> – фосфаты щелочных и щелочноземельных металлов, аммония, Ca-P<sub>II</sub> – разноосновные фосфаты кальция (магния), Ca-P<sub>III</sub> – труднорастворимые высокоосновные фосфаты кальция типа апатита. Выделение из почвы отдельных минеральных форм фосфора, различающихся по химическому составу, растворимости и доступности растениям, позволяет получить представление о соотношении лабильных и труднодоступных форм фосфора в почве и предвидеть их превращения [11].

Исследования фракционного состава минеральных фосфатов дерново-подзолистой тяжело-суглинистой почвы показали, что наибольшую долю в составе минеральных фосфатов (контрольный вариант) по всему профилю занимали фосфаты железа (Fe-P) (43–60%), что характерно для почв подзолистого типа (табл. 2). Высокое содержание Fe-P объясняется повышенным содержанием железа в данных почвах [5–7, 11, 12]. Следующей шла фракция высокоосновных фосфатов кальция (Ca-P<sub>III</sub>) – 17–34%. Фосфаты кальция 2-й группы (Ca-P<sub>II</sub>) и фосфаты алюминия (Al-P) составили 12–13 и 8–9% от общего содержания минеральных фосфатов. Фосфаты кальция 1-й группы (Ca-P<sub>I</sub>), самой доступной для растений, занимали всего 1–2%. Характер распределения каждой фракции по профилю имел свои особенности. Содержание Fe-P и Ca-P<sub>I</sub> вниз по профилю почвы снижалось, количество Ca-P<sub>III</sub> увеличивалось. Содержание Ca-P<sub>II</sub> и Al-P в 1-метровом слое почвы изменялось незначительно и находилось примерно на одном уровне.

Длительное систематическое применение удобрений привело к существенному изменению долей всех групп минеральных фосфатов. Внесение органических удобрений (навоз КРС, ОСВ) повысило содержание наиболее доступных для растений групп Ca-P<sub>I</sub> и Ca-P<sub>II</sub>. Положительное действие органических веществ, внесенных с удобрениями, на увеличение подвижности фосфатов выражается уменьшением сорбции фосфора почвами, а также мобилизацией фосфора из труднорастворимых соединений [13–16]. Кроме этого, поступление в почву органических удобрений обеспечивает нормальное функционирование почвенных микроорганизмов, что является

**Таблица 2.** Влияние длительного применения удобрений на содержание фракций минеральных фосфатов дерново-подзолистой почвы, мг/кг

| Вариант                    | Слой почвы, см |       |       |       |        |
|----------------------------|----------------|-------|-------|-------|--------|
|                            | 0–20           | 20–40 | 40–60 | 60–80 | 80–100 |
| Ca-P <sub>I</sub>          |                |       |       |       |        |
| Контроль                   | 26             | 21    | 18    | 13    | 15     |
| Навоз                      | 43             | 19    | 14    | 12    | 9      |
| ОСВ                        | 42             | 30    | 15    | 13    | 14     |
| НРК (фон)                  | 95             | 68    | 85    | 87    | 80     |
| Фон + навоз                | 184            | 90    | 77    | 82    | 75     |
| Фон + ОСВ                  | 228            | 159   | 144   | 92    | 80     |
| НСР <sub>05</sub>          | 12             | 5     | 5     | 2     | 4      |
| Ca-P <sub>II</sub>         |                |       |       |       |        |
| Контроль                   | 152            | 155   | 156   | 165   | 164    |
| Навоз                      | 216            | 215   | 210   | 161   | 164    |
| ОСВ                        | 185            | 187   | 170   | 167   | 174    |
| НРК (фон)                  | 241            | 191   | 199   | 190   | 211    |
| Фон + навоз                | 186            | 200   | 185   | 189   | 188    |
| Фон + ОСВ                  | 323            | 224   | 213   | 213   | 201    |
| НСР <sub>05</sub>          | 8              | 19    | 14    | 6     | 16     |
| Al-P                       |                |       |       |       |        |
| Контроль                   | 116            | 121   | 102   | 101   | 108    |
| Навоз                      | 138            | 119   | 110   | 106   | 115    |
| ОСВ                        | 179            | 156   | 152   | 138   | 140    |
| НРК (фон)                  | 167            | 123   | 85    | 83    | 77     |
| Фон + навоз                | 145            | 84    | 74    | 72    | 73     |
| Фон + ОСВ                  | 185            | 137   | 107   | 105   | 93     |
| НСР <sub>05</sub>          | 14             | 6     | 10    | 6     | 10     |
| Fe-P                       |                |       |       |       |        |
| Контроль                   | 771            | 722   | 596   | 596   | 540    |
| Навоз                      | 857            | 704   | 642   | 642   | 540    |
| ОСВ                        | 991            | 788   | 662   | 641   | 657    |
| НРК (фон)                  | 1106           | 1140  | 493   | 592   | 605    |
| Фон + навоз                | 774            | 790   | 606   | 534   | 626    |
| Фон + ОСВ                  | 880            | 761   | 707   | 650   | 700    |
| НСР <sub>05</sub>          | 90             | 96    | 24    | 38    | 44     |
| Ca-P <sub>III</sub>        |                |       |       |       |        |
| Контроль                   | 224            | 260   | 335   | 406   | 422    |
| Навоз                      | 206            | 254   | 334   | 372   | 441    |
| ОСВ                        | 283            | 350   | 395   | 434   | 379    |
| НРК (фон)                  | 334            | 379   | 452   | 421   | 487    |
| Фон + навоз                | 292            | 348   | 392   | 468   | 472    |
| Фон + ОСВ                  | 286            | 313   | 358   | 404   | 470    |
| НСР <sub>05</sub>          | 22             | 51    | 43    | 28    | 70     |
| Сумма минеральных фосфатов |                |       |       |       |        |
| Контроль                   | 1290           | 1280  | 1210  | 1280  | 1250   |
| Навоз                      | 1460           | 1310  | 1310  | 1290  | 1270   |
| ОСВ                        | 1680           | 1510  | 1390  | 1390  | 1360   |
| НРК (фон)                  | 1940           | 1900  | 1310  | 1370  | 1460   |
| Фон + навоз                | 1580           | 1510  | 1330  | 1350  | 1430   |
| Фон + ОСВ                  | 1900           | 1590  | 1530  | 1460  | 1540   |
| НСР <sub>05</sub>          | 110            | 100   | 100   | 50    | 70     |

важнейшим условием оптимизации фосфатного питания растений [17].

Увеличение содержания Са-Р<sub>I</sub> в варианте с навозом наблюдали в пахотном горизонте почвы (в 1.6 раза), в варианте с *ОСВ* — в пахотном и подпахотном слоях почвы (в 1.4–1.6 раза). Достоверное увеличение содержания фракции Са-Р<sub>II</sub> в результате применения органических удобрений наблюдали до глубины 60 см (в 1.1–1.4 раза).

При внесении *ОСВ* во всем 1-метровом слое повысилось содержание фракций Al-Р (в 1.3–1.5 раза) и Fe-Р (в 1.1–1.3 раза). Применение навоза КРС в меньшей степени повлияло на содержание фосфатов, связанных с полуторными оксидами. Отмечено увеличение содержания Al-Р в пахотном горизонте (в 1.2 раза), Fe-Р — в слоях 0–20, 40–60 и 60–80 см почвы (в 1.1 раза). Внесение *ОСВ* достоверно повысило в почве содержание Са-Р<sub>III</sub> до глубины 80 см. Применение навоза не оказало существенного влияния на изменение группы высокоосновных фосфатов кальция, либо были отмечены тенденции к снижению содержания данной группы фосфатов в некоторых слоях почвы. Полученные результаты возможно связаны с разным химическим и качественным составом примененных органических удобрений. Минеральная часть осадков представлена в основном соединениями кальция, алюминия, железа и кремния. При внесении *ОСВ* в течение 5-ти ротаций в почву поступило ≈1800 кг фосфора, с навозом в почву было внесено ≈750 кг фосфора.

Общее количество минеральных фосфатов при внесении навоза достоверно возросло только в пахотном слое почвы (на 170 мг/кг или в 1.1 раза), при этом остаточный фосфор удобрения (расчеты проведены разностным методом по сравнению с контрольным вариантом) распределился между следующими фракциями: 46% — Fe-Р, 34% — Са-Р<sub>III</sub>, 11% — Al-Р и 9% — Са-Р<sub>I</sub>. Применение *ОСВ* повысило общее количество минеральных фосфатов во всем профиле: в верхних слоях почвы — на 18–30, в нижних — на 9%. Остаточный фосфор удобрения распределился между следующими фракциями: 28–74% — Fe-Р, 15–39% — Са-Р<sub>III</sub>, 15–33% — Al-Р, 2–14% — Са-Р<sub>II</sub> и 1–4% — Са-Р<sub>I</sub> (в среднем в горизонтах: 47% — Fe-Р, по 22% Са-Р<sub>III</sub> и Al-Р, 8% — Са-Р<sub>II</sub> и 1% — Са-Р<sub>I</sub>).

Внесение NPK в течение 5-ти ротаций полевого 7-польного севооборота (1-я ротация — N120P120K120, 2-я ротация — N90P90K90, 3–5-я ротации — N60P60K60) достоверно повысило содержание в почве фракций фосфатов, связанных с кальцием во всем 1-метровом слое: Са-Р<sub>I</sub> — в 3.2–6.8 раза, Са-Р<sub>II</sub> — в 1.2–1.6 раза, Са-Р<sub>III</sub> — в

1.2–1.5 раза. Наиболее существенное увеличение отмечено для Са-Р<sub>I</sub>, их доля в составе минеральных фосфатов возросла с 1–2% (контрольный вариант) до 4–6%. Содержание Al-Р возросло в верхнем слое (0–20 см) почвы, а затем было отмечено снижение содержания данной группы минеральных фосфатов до глубины 100 см. Количество Fe-Р существенно возросло в пахотном и подпахотном слоях почвы (в 1.4–1.6 раза). В слое 0–40 см почвы остаточные фосфаты закрепились в большей степени в виде Fe-Р и Са-Р<sub>III</sub>, в слое 40–100 см — в виде всех 3-х групп Са-Р. Сумма минеральных фосфатов возросла во всем 1-метровом профиле, максимальное увеличение отмечено в пахотном и подпахотном слоях на 621–654 мг/кг (на 49–51%).

Результаты наших исследований по влиянию минеральных удобрений на фосфатный режим почвы несколько отличаются от результатов других авторов и больше сопоставимы для пахотного слоя почвы. По данным работ [6, 18–20], при длительном внесении фосфорных удобрений как с известкованием, так и без него, остаточный фосфор удобрений в большей степени превращался в фосфаты оксидов железа и алюминия в результате подкисления почвы, тогда как регулярное применение навоза создавало условия для образования высокоосновных фосфатов кальция. В работах [6, 21, 22] отмечали, что внесение водорастворимых фосфорных удобрений обеспечило увеличение доли фосфатов алюминия. Возможно, полученные нами результаты связаны с генетическими особенностями почвы. Почвообразующей породой является желто-бурая некарбонатная покровная глина. Характерной особенностью почвы, сформированной на богатых в минералогическом отношении пермских глинах, является высокое содержание обменных форм кальция и магния, которое, как и сумма поглощенных оснований, увеличивается с глубиной. По данным [11], в почвах с высокой насыщенностью основаниями большая часть внесенного фосфора переходит во фракцию Са-Р. Другой причиной может являться временной фактор (опубликованные исследования проводили на различных агрохимических фонах, сложившихся во времени).

Устойчивость различных минеральных соединений фосфора (ортофосфатов Са, Al, Fe) в значительной степени зависит от почвенных условий, в частности, от величины кислотности почвенного раствора. Установлено, что фосфаты кальция наиболее устойчивы в условиях щелочной или близкой к нейтральной реакции среды, а растворимость этих соединений увеличивается с ее подкислением [5–7]. Длительное применение

минеральных удобрений в условиях нашего длительного стационарного опыта привело к существенному подкислению почвы во всем 1-метровом профиле [23], что также могло повлиять на увеличение в этом варианте содержания фосфатов, связанных с кальцием.

Применение навоза КРС при применении минеральных удобрений оказало существенное влияние на изменение содержания фракции  $\text{Ca-P}_I$ . Отмечено увеличение самой доступной для растений фракции фосфора, связанной с щелочными и щелочноземельными металлами, в слое 0–20 см почвы в 1.9 раза, в слое 20–40 см – в 1.3 раза по сравнению с вариантом внесения минеральных удобрений. Внесение *ОСВ* совместно с минеральными удобрениями достоверно повысило содержание в почве  $\text{Ca-P}_I$  и  $\text{Ca-P}_{II}$ . Изменения отмечены до глубины 80 см. Содержание  $\text{Ca-P}_I$  возросло в 1.1–2.4 раза,  $\text{Ca-P}_{II}$  – в 1.1–1.3 раза. Максимальное накопление отмечено в пахотном и подпахотном слоях почвы.

Применение разных видов органических удобрений (навоза, *ОСВ*) в сочетании с минеральными по-разному сказалось на закреплении остаточных фосфатов. При совместном внесении навоза и НРК остаточные фосфаты закрепились в виде групп  $\text{Ca-P}$  ( $\text{Ca-P}_I$  – 30–54%,  $\text{Ca-P}_{II}$  – 13–23% и  $\text{Ca-P}_{III}$  – 27–45%). Сочетание *ОСВ* и минеральных удобрений привело в большей степени к закреплению фосфатов в группах  $\text{Ca-P}_I$  (22–44%),  $\text{Ca-P}_{II}$  (13–28%) и  $\text{Al-P}$  (12–54%).

Длительное применение удобрений привело к существенному увеличению в дерново-подзолистой почве доли подвижных фракций фосфатов (суммы  $\text{Ca-P}_I$  и  $\text{Ca-P}_{II}$ ) с 14 (контрольный вариант) до 17–29%. Полученные результаты подтверждены исследованиями других авторов [6, 11, 24]. При внесении минеральных удобрений и совместном применении органических и минеральных отмечено увеличение доли подвижных фосфатов в 1-метровом слое почвы, при внесении навоза – до глубины 60 см.

Об особенностях фосфатного режима почв можно судить по соотношению суммы фосфатов кальция  $\text{Ca-P}_I + \text{Ca-P}_{II}$  и суммы фосфатов полуторных оксидов ( $\text{Al-P} + \text{Fe-P}$ ). Чем больше эта величина, тем доступнее фосфор растениям [25]. По нашим данным, величина соотношения в контрольном варианте пахотного горизонта составила 0.20 и увеличивалась вниз по профилю до 0.28. Длительное внесение навоза, минеральных удобрений повысило это соотношение в пахотном горизонте почвы до 0.26, применение органо-минеральной системы

удобрения (навоз + НРК, *ОСВ* + НРК) обеспечило увеличение величины соотношения до 0.40–0.52. При внесении минеральных удобрений в чистом виде и их сочетании с органическим наблюдали повышение данного соотношения во всем метровом профиле, в варианте с навозом – до глубины 60 см. В варианте с *ОСВ* соотношение суммы фосфатов кальция  $\text{Ca-P}_I + \text{Ca-P}_{II}$  и суммы фосфатов  $\text{Al-P} + \text{Fe-P}$  сохранилось на уровне контроля во всех слоях почвы.

Установлена прямая сильная и средняя корреляционная зависимость фракций  $\text{Ca-P}_I$ ,  $\text{Ca-P}_{II}$  и  $\text{Al-P}$  с содержанием органического углерода в почве как в пахотном горизонте почвы, так и в метровом слое ( $r = 0.5–0.9$ ) (табл. 3). Отмечена обратная связь содержания фосфатов кальция 1-й и 2-й группы с кислотностью почвы ( $r = 0.6–0.8$ ).

Изучали влияние длительного применения удобрений на содержание подвижного фосфора в почве и степень подвижности фосфатов (рис. 1). Содержание подвижного фосфора в контрольном варианте увеличивалось вниз по профилю со 126 (0–20 см) до 305 мг/кг (80–100 см). Количество подвижного фосфора в пахотном горизонте соответствовало повышенному уровню – 100–150 мг/кг. Известно, что внесение удобрений в первую очередь увеличивает содержание подвижных, доступных для растений форм фосфора в почве [26, 27], что подтвердили результаты и наших исследований. Внесение *ОСВ* существенно повысило содержание подвижного фосфора в почве до глубины 60 см (на 66–130 мг/кг), с увеличением глубины степень влияния *ОСВ* снижалась. Содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте составило 233 мг/кг, что соответствовало высокому уровню (150–250 мг/кг). Запасы подвижного фосфора в пахотном слое почвы увеличились с 0.3 (контрольный вариант) до 0.6, в 1-метровом слое – с 3.1 до 3.9 т/га.

Осадки сточных вод содержат значительное количество фосфора и поэтому их можно рассматривать как возможный альтернативный источник данного элемента [28–31]. При правильном выборе доз *ОСВ* длительное время могут обеспечивать бездефицитный баланс фосфорного питания [28, 32, 33]. Содержание общего фосфора в сухой массе *ОСВ* может достигать 8%. Доступность фосфора в различных осадках не одинакова. Доля биологически и химически связанного фосфора зависит от технологий, применяемых на очистных сооружениях и вида *ОСВ*. По данным [34], во вторичном и сброженном иле фосфор был на 92 и 63% представлен минеральной формой, в первичном иле – на 72% органической формой.

**Таблица 3.** Закономерности изменения фосфатного режима в зависимости от агрохимических свойств почвы (коэффициент корреляции)

| Показатель                            | C <sub>орг</sub> , % |       | pH <sub>KCl</sub> |       | S             | V     |       | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг |      |       |
|---------------------------------------|----------------------|-------|-------------------|-------|---------------|-------|-------|---------------------------------------|------|-------|
|                                       |                      |       |                   |       | смоль(экв)/кг |       |       |                                       |      |       |
|                                       | слой почвы, см       |       |                   |       |               |       |       |                                       |      |       |
|                                       | 0–20                 | 0–100 | 0–20              | 0–100 | 0–20          | 0–100 | 0–20  | 0–100                                 | 0–20 | 0–100 |
| Ca-P <sub>I</sub> , мг/кг             | 0.9                  | 0.6   | –0.8              | –0.7  | 0.1*          | –0.4  | –0.7  | –0.5                                  | 0.9  | 0.6   |
| Ca-P <sub>II</sub> , мг/кг            | 0.7                  | 0.5   | –0.6              | –0.6  | 0.0*          | –0.4  | –0.5  | –0.5                                  | 0.7  | 0.4   |
| Al-P, мг/кг                           | 0.6                  | 0.7   | –0.4*             | 0.0*  | 0.6           | –0.6  | –0.2* | –0.6                                  | 0.7  | –0.2* |
| Fe-P, мг/кг                           | –0.2*                | 0.7   | –0.2*             | –0.5  | 0.5           | –0.7  | –0.1* | –0.8                                  | 0.3  | –0.1* |
| Ca-P <sub>III</sub> , мг/кг           | 0.3*                 | –0.7  | –0.7              | 0.1*  | 0.6           | 0.8   | –0.7  | 0.7                                   | 0.8  | 0.6   |
| Сумма минеральных<br>фосфатов, мг/кг  | 0.5                  | 0.7   | –0.7              | –0.6  | 0.5           | –0.6  | –0.6  | –0.7                                  | 0.8  | 0.4   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг | 0.8                  | –0.1* | –0.8              | –0.4  | 0.4*          | 0.2*  | –0.8  | 0.1*                                  | —    | —     |
| Степень подвижности<br>фосфатов, мг/л | 0.9                  | 0.7   | –0.8              | –0.5  | 0.0*          | –0.5  | –0.8  | –0.6                                  | 0.9  | 0.4   |

\*Несущественно.

Содержание биодоступного фосфора было больше во вторичном и сброженном иле в 3–4 раза, чем в первичном. В работе [35] отмечено, что в сырых *ОСВ* фосфор более доступен для растений, чем после его подсушивания на иловых картах. Извлечение фосфорных соединений из *ОСВ* является предметом многочисленных научных исследований, разработано множество технологий (окисление озоном, химическое осаждение, нанофильтрация, термическая обработка, ультразвуковое растворение и др.). В статье [36] представлен способ низкотемпературной обработки *ОСВ* при различном насыщении кислородом (20, 60, 100%), который обеспечивает увеличение общего содержания фосфора в зольном остатке на 45.6%, повышение биодоступности фосфора в 3 раза. Исследования [37] показали, что при извлечении фосфора из *ОСВ* эффективно применение нанофильтрации. После кислотного растворения *ОСВ* и фильтрации на специально разработанной мембране извлекали до 90% от исходного содержания фосфора. Однако, учитывая их сложность и высокую стоимость, большинство технологий были протестированы только в лабораторных условиях или существуют в качестве пилотных проектов [30, 31].

При внесении навоза отмечены только тенденции к повышению содержания подвижного фосфора в почве в пахотном и подпахотном слоях на 32–40 мг/кг. Запасы подвижного фосфора в пахотном слое почвы увеличились до 0.4, в 1-метровом слое – до 3.4 т/га.

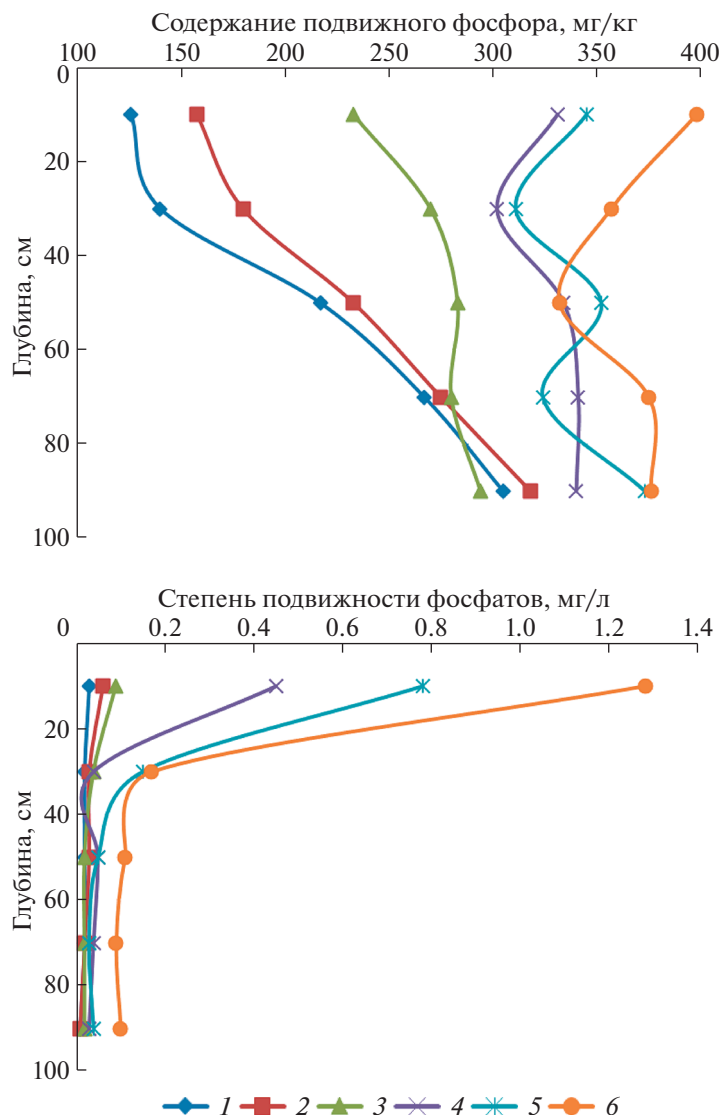
Важный показатель оценки обеспеченности сельскохозяйственных культур фосфором – степень подвижности фосфатов (концентрация фосфат-ионов, находящихся в почвенном растворе) [10]. По данным [38], минимальная концентрация фосфора, при которой растения могут его усваивать, составляет 0.01–0.03 мг  $P_2O_5$ /л.

Степень подвижности фосфатов в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы контрольного варианта составила 0.03 мг/л, что соответствовало низкому уровню содержания легкодоступного фосфора для растений (<0.04 мг/л). Степень подвижности фосфатов уменьшалась с глубиной и составила 0.01 мг/л в слое 80–100 см. Применение навоза и *ОСВ* достоверно повысило степень подвижности фосфатов только в пахотном слое с 0.03 до 0.06 и до 0.09 мг/л соответственно. В результате почва перешла в разряд средней обеспеченности доступным фосфором для растений.

Длительное внесение минеральных удобрений (всего в почву поступило  $\approx 2$  т фосфора) способствовало существенному увеличению в пахотном слое дерново-подзолистой почвы содержания подвижного фосфора до 331 мг/кг (очень высокое содержание >250 мг/кг), его количество увеличилось на 205 мг/кг почвы.

Как указывали в работе [19], несмотря на то что в почве основная часть неиспользованного фосфора минеральных удобрений превращалась со временем в фосфаты оксидов железа и алюминия, в систематически удобряемой почве резко





**Рис. 1.** Влияние длительного применения удобрений на содержание подвижного фосфора и степень подвижности фосфатов дерново-подзолистой почвы. Варианты: 1 — контроль без удобрений, 2 — навоз, 3 — *ОСВ*, 4 — *НРК* — фон, 5 — фон + навоз, 6 — фон + *ОСВ*.

возрастает степень подвижности фосфатов и, следовательно, доступность их для растений. По результатам наших исследований, степень подвижности фосфатов при длительном внесении *НРК* возросла в 15 раз (до 0.45 мг/л), что соответствовало высокому уровню обеспеченности растений легкодоступным фосфором.

Влияние минеральных удобрений на содержание подвижного фосфора и степень подвижности фосфатов наблюдали до глубины 100 см. Запасы подвижного фосфора возросли до 0.8 т/га, в 1-метровом слое — до 4.8 т/га.

Применение органо-минеральной системы удобрения в большей степени оказало влияние на степень подвижности фосфатов, чем содержание

подвижного фосфора. Степень подвижности фосфатов достоверно возросла во всем 1-метровом профиле при совместном внесении минеральных удобрений и *ОСВ* (по сравнению с вариантом минеральных удобрений). Максимальное увеличение отмечено в пахотном слое с 0.45 до 1.28 (в 2.8 раза) и подпахотном — с 0.04 до 0.17 мг/л (в 4.3 раза). Применение навоза совместно с минеральными удобрениями достоверно повысило степень подвижности фосфатов в пахотном и подпахотном слоях до 0.78 и 0.15 мг/л. Содержание подвижного фосфора возросло при совместном внесении минеральных удобрений и *ОСВ* только в верхнем слое (0–20 см) почвы, его количество увеличилось до 398 мг/кг. Дополнительное

применение навоза на фоне применения NPK не оказало существенного влияния на изменение данного показателя. Установлена прямая сильная корреляционная связь между степенью подвижности фосфатов и содержанием подвижного фосфора в пахотном горизонте почвы ( $r = 0.9$ ) и средняя ( $r = 0.4$ ) для 1-метрового слоя.

Результаты длительного стационарного опыта свидетельствовали об изменении фосфатного режима дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы в результате применения минеральных удобрений и *ОСВ* до глубины 1 м. В соответствии со сложившимся представлением, фосфор обладает низкой способностью к миграции вследствие быстрой абиотической фиксации фосфора в труднорастворимых минеральных соединениях [5, 7], фосфор слабо передвигается из пахотного слоя в нижележащие слои [39, 40]. Однако есть исследования, которые показали, что фосфор способен к перемещению вниз по профилю, и в первую очередь это связывают с интенсивным и систематическим применением удобрений [41–45]. Миграция фосфора может быть как пассивной (в составе частиц ила, физической глины), так и активной в растворе почвенной влаги [6]. Перемещение фосфора вниз по профилю может быть связано с миграцией органических соединений, с механическим воздействием (обработкой почвы, ростом корневых систем) [21, 43]. В работах [46–48] отмечено, что в кислых почвах при повышенной фосфатной нагрузке образуются соединения фосфора, связанные с железом и алюминием, обладающие повышенной миграционной способностью. По данным [49], анионы фосфорных удобрений (суперфосфата) оказывают разрушающее воздействие на находящиеся с ними в контакте глинистые минералы, происходит деструктирование слоистых силикатов и образование более мобильных металлоорганических соединений фосфора.

## ВЫВОДЫ

1. В дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Предуралья в составе минеральных фосфатов фракция Fe-P занимала 43–60, Ca-P – 31–48, Al-P – 8–9%. В фосфатах кальция 56–70% приходилось на фракцию Ca-P<sub>III</sub> – труднорастворимых высокоосновных фосфатов типа апатита. Фосфаты кальция первой группы – самой доступной для растений – занимали всего 1–2% от общего количества минеральных фосфатов. Содержание фракций Fe-P и Ca-P<sub>I</sub> вниз по профилю почвы снижалось, количество Ca-P<sub>III</sub> увеличивалось.

Содержание Ca-P<sub>II</sub> и Al-P изменяется незначительно.

2. Внесение нетрадиционного органического удобрения осадка сточных вод (*ОСВ*) достоверно повысило в пахотном слое почвы содержание всех фракций фосфатов в 1.2–1.6 раза, сумма минеральных фосфатов возросла на 30%. Увеличение количества фосфатов кальция наблюдали до глубины 80 см, содержания алюмо- и железофосфатов – до 100 см. Применение *ОСВ* повысило общее количество минеральных фосфатов во всем профиле. Внесение навоза КРС в меньшей степени повлияло на минеральный состав фосфатов. Достоверные изменения отмечены в пахотном слое почвы. Содержание фракций Ca-P<sub>I</sub>, Ca-P<sub>II</sub>, Al-P и Fe-P возросло в 1.1–1.6 раза, количество минеральных фосфатов – на 13%. Полученные результаты в первую очередь обусловлены разным химическим составом изученных органических удобрений. Также следует отметить, что остаточный фосфор удобрения при внесении *ОСВ* в большей степени закрепился в виде Fe-P, Al-P и Ca-P<sub>III</sub>, при использовании навоза – в виде Fe-P и доступных для растений фракций Ca-P<sub>II</sub>, Ca-P<sub>I</sub>.

3. Длительное внесение NPK повысило в пахотном слое почвы содержание всех групп минеральных фосфатов в 1.4–3.6 раза. Отмечено увеличение содержания фосфатов кальция во всем 1-метровом слое почвы, содержания Fe-P – в слое 0–40 см. Содержание Al-P с глубиной снизилось на 27–32%. В слое 0–40 см почвы остаточные фосфаты закрепились в виде Fe-P и Ca-P<sub>III</sub>, в слое 40–100 см – в виде всех 3-х групп Ca-P. Применение навоза КРС совместно с минеральными удобрениями существенно повысило содержание в почве фракции Ca-P<sub>I</sub>, внесение *ОСВ* – Ca-P<sub>I</sub> и Ca-P<sub>II</sub>. Максимальное увеличение наблюдали в пахотном и подпахотном слоях почвы.

4. Длительное внесение органических и минеральных удобрений оказало положительное влияние на содержание в почве подвижного фосфора и степень подвижности фосфатов. Отмечено увеличение запасов подвижного фосфора в пахотном слое почвы и в 1-метровом слое.

5. При систематическом внесении удобрений в почве происходило существенное накопление остаточного пула фосфора, который может быть потенциально мобилизован с помощью различных технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cramer M.D.* Phosphate as a limiting resource // *Plant Soil*. 2010. V. 334. № 1. С. 10. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0497-9>
2. *Богдевич И.М., Путятин Ю.В., Станилевич И.С., Ломонос О.Л.* Изменение обеспеченности фосфором пахотных и луговых почв Беларуси // *Почвовед. и агрохим.* 2019. № 2. С. 68–78.
3. *Кайгородов А.Т., Пискунова Н.И.* Современное состояние почвенного плодородия пахотных земель Пермского края // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2017. Т. 31. № 4. С. 22–26.
4. *Мудрых Н.М.* Динамика агрохимических показателей плодородия пахотных почв Пермского края // *Рос. журн. прикл. экол.* 2019. № 2. С. 27–31.
5. *Андрианов С.Н.* Формирование фосфатного режима дерново-подзолистой почвы в разных системах удобрений. М.: ВНИИА, 2004. 296 с.
6. *Титова В.И., Шафранов О.Д., Варламова Л.Д.* Фосфор в земледелии Нижегородской области. Н. Новгород: ВВАГС, 2005. 219 с.
7. *Сычёв В.Г., Кирпичников Н.А.* Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях. М.: ВНИИА, 2009. 176 с.
8. *Гинзбург К.Е., Лебедева Л.С.* Методика определения минеральных форм фосфатов почвы // *Агрохимия*. 1971. № 1. С. 125–136.
9. Практикум по агрохимии: Учеб. пособ. / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 639 с.
10. *Карпинский Н.П., Замятина В.Б.* Фосфатный уровень почвы // *Почвоведение*. 1958. № 11. С. 27–39.
11. *Гинзбург К.Е.* Фосфор основных типов почв СССР. М.: Наука, 1981. 244 с.
12. *Соколов А.В.* Агрохимия фосфора. М.: Изд-во АН СССР, 1950. 150 с.
13. *Донских И.Н., Копылова Л.А.* Влияние высоких доз органических удобрений на фракционный состав фосфатов в дерново-подзолистых почвах // *Агрохимия*. 1982. № 4. С. 55–63.
14. *Rogova O.B., Kolobova N.A., Ivanov A.L.* Phosphorus sorption capacity of gray forest soil as dependent on fertilization system // *Euras. Soil Sci.* 2018. V. 51. № 5. P. 536–541. <https://doi.org/10.1134/S1064229318050101>
15. *Menezes-Blackburn D., Giles C., Darch T., George T.S., Blackwell M., Stutter M., Shand C., Lumsdon D., Cooper P., Wendler R.* Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review // *Plant and Soil*. 2018. V. 427(1–2). P. 5–16. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3362-2>
16. *Szara E., Sosulski T., Szymanska M.* Soil phosphorus sorption properties in different fertilization systems // *Plant Soil Environ.* 2019. V. 65(2). P. 78–82. <https://doi.org/10.17221/696/2018-PSE>
17. *Фокин А.Д., Раджабова П.А.* Биологическая мобилизация фосфора из минеральных соединений // *Изв. ТСХА*. 1994. Вып. 2. С. 72–79.
18. *Никифорова Л.И., Лебединская В.Н.* Формы и подвижность фосфатов в серой оподзоленной почве в связи с длительным применением удобрений // *Агрохимия*. 1983. № 10. С. 89–96.
19. *Хлыстовский А.Д., Князева К.П.* Влияние длительного применения различных форм фосфорных удобрений на фракционный состав минеральных фосфатов дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы // *Агрохимия*. 1969. № 6. С. 15–21.
20. *Хлыстовский А.Д., Касицкий Ю.И.* Последствие фосфора, оптимальные фосфатные уровни в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве и применение фосфорных удобрений // *Агрохимия*. 1987. № 5. С. 10–14.
21. *Носко Б.С., Христенко А.А.* Влияние состава и свойств почв на результаты определения содержания подвижного фосфора химическими методами // *Агрохимия*. 1996. № 4. С. 86–94.
22. *Лыскова И.В., Рылова О.Н., Веселкова Н.А., Лыскова Т.В.* Влияние удобрений и известки на агрохимические показатели и фосфатный режим дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы // *Аграр. наука Евро-Северо-Востока*. 2015. № 2(45). С. 27–31.
23. *Васбиева М.Т.* Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении удобрений // *Почвоведение*. 2021. № 1. С. 90–99. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21010135>
24. *Li C.L., Zhang P., Zhang J.J., Zhu P., Wang L.C.* Forms, transformations and availability of phosphorus after 32 years of manure and mineral fertilization in a Mollisol under continuous maize cropping // *Arch. Agron. Soil Sci.* 2020. V. 66. P. 552–558. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1787385>
25. *Ubugunov L.L., Merkusheva M.G., Enkhtuyaa B.* The content of available mineral phosphorus compounds in chestnut soils of Northern Mongolia upon application of different forms of phosphorite // *Euras. Soil Sci.* 2015. V. 48. № 6. P. 634–642. <https://doi.org/10.1134/S1064229315060113>
26. *Касицкий Ю.И.* Общие вопросы установления оптимального содержания подвижного фосфора в почвах // *Агрохимия*. 1988. № 10. С. 129–140.
27. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф.* Действие и последствие удобрений на плодородие дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы // *Агрохимия*. 2005. № 1. С. 5–13.
28. *Пахненко Е.П.* Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2007. 311 с.
29. *Ott C., Rechberger H.* The European phosphorus balance // *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. V. 60. P. 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.007>
30. *Gao M., Qiu L.P., Xie K., Zhang S.B., Wang J.B.* Phosphorus recovery from excess sludge: Possibility and future. Proceedings of the 2015 4<sup>th</sup> International conference on sustainable energy and environmental engineering // *Adv. Engin. Res.* 2016. V. 53. P. 488–491.
31. *Kecskesova S., Imreova Z., Kozarova B., Drtil M.* Phosphorus recovery from the sewage sludge and sewage sludge ash // *Chemicke listy*. 2020. V. 114. № 5. P. 341–348.
32. Стратегия использования осадков сточных вод и компостов на их основе в агрикультуре / Под ред. Милащенко Н.З. М.: Агроконсалт, 2002. 140 с.
33. *Vasbieva M.T., Kosolapova A.I.* Changes in fertility parameters and contents of heavy metals of soddy-podzolic soils upon the long-term application of sewage

- sludge // *Euras. Soil Sci.* 2015. V. 49. P. 518–523.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229315030138>
34. Zhang S.X., Cui W.Z., Liu D.F., Huang W.L. Identification of phosphorus species and bio-availability in primary, secondary and digested sludge // *Appl. Ecol. Environ. Res.* 2019. V. 17. Is. 6. P. 14391–14402.  
[https://doi.org/10.15666/aer/1706\\_1439114402](https://doi.org/10.15666/aer/1706_1439114402)
  35. Покровская С.Ф., Касатиков В.А. Использование осадков городских сточных вод в сельском хозяйстве. М.: ВНИИТЭИ агропром, 1987. 56 с.
  36. Meng X.D., Huang Q.X., Gao H.P., Tay K.R., Yan J.H. Improved utilization of phosphorous from sewage sludge (as fertilizer) after treatment by low-temperature combustion // *Waste Manag.* V. 80. P. 349–358.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.034>
  37. Thong Z.W., Cui Y., Ong Y.K., Chung T.S. Molecular design of nanofiltration membranes for the recovery of phosphorus from sewage sludge // *ACS Sustain. Chem. Engin.* 2016. V. 4(10). P. 5570–5577.  
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01299>
  38. Клековский В.М. Об усвоении растениями поглощенных почвой фосфатов // Докл. ТСХА. 1945. № 11. С. 11–14.
  39. Афанасьев Р.А., Мёрзлая Г.Е. Динамика подвижных форм фосфора и калия в почвах длительных опытов // Докл. РАСХН. 2013. № 3. С. 30–33.
  40. Brogowski Z., Chojnicki J. Distribution of phosphorus in granulometric fractions of cambisol developed from morainic loam // *J. Elementol.* 2020. V. 25. Is. 1. P. 181–191.  
<https://doi.org/10.5601/jelem.2019.24.3.1902>
  41. Ciapparelli I.C., de Iorio A.F., Garcia A.R. Phosphorus downward movement in soil highly charged with cattle manure // *Environ. Earth Sci.* 2016. V. 75. Is. 7. № P. 568.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-016-5284-3>
  42. Бойко В.С., Гавар С.П., Морозова Е.Н., Тимохин А.Ю. Фосфатный режим длительно орошаемой лугово-черноземной почвы в лесостепи Западной Сибири // *Агрохимия.* 2015. № 3. С. 10–16.
  43. Шустикова Е.П., Шаповалова Н.Н. Азотный режим чернозема обыкновенного и продуктивность сельскохозяйственных культур в последствии различных доз азотных удобрений // *Агрохимия.* 2014. № 2. С. 20–25.
  44. Кириллова Г.Б., Жуков Ю.П. Изменение фосфатного режима дерново-подзолистей суглинистой почвы при сельскохозяйственном использовании // *Агрохимия.* 2004. № 9. С. 26–31.
  45. Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф. Значение фосфора в улучшении свойств дерново-подзолистей почвы при действии и последствии длительного применения минеральных удобрений // *Пробл. агрохим. и экол.* 2009. № 2. С. 3–9.
  46. Кудеярова А.Ю., Алексеева Т.В. Трансформация соединений Al и Fe при зафосфачивании кислых почв как фактор, определяющий миграцию фосфора // *Агрохимия.* 2012. № 2. С. 25–36.
  47. Kudeyarova A.Yu. Changes in the system of chemical bonds in gibbsite under the impact of  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  solutions of different concentrations // *Euras. Soil Sci.* 2016. V. 49. P. 519–528.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229316050094>
  48. Аргунова В.А. Исследование форм и миграции фосфора в подзолистых почвах: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1974. 18 с.
  49. Chizhikova N.P., Godunova E.I., Kubashev S.K. Changes in clay minerals of vertic chernozems under the impact of different ameliorants in a model experiment // *Euras. Soil Sci.* 2008. V. 41. P. 1124–1134.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229308100153>

## Changes in the Fractional Composition of Mineral Phosphates, Content of Mobile Phosphorus and Degree of Mobility of Phosphates along the Profile of Sod-Podzolic Soil of Long-Term Application of Fertilizers

M. T. Vasbieva

*Perm Agricultural Researcher Institute of Perm Federal Research Center Ural Branch RAS  
 ul. Kultury 12, Perm region, Perm district, s. Lobanovo 614532, Russia  
 E-mail: vasbievamt@gmail.com*

The effect of the use of organic (cattle manure, sewage sludge) and mineral fertilizers was studied on the fractional composition of mineral phosphates (Ginzburg–Lebedeva method), the content of mobile phosphorus, and the degree of mobility of phosphates in sod-podzolic heavy loamy soil. The studies were carried out under conditions of a long-term stationary experiment, laid down in 1976, in a meter layer of soil. The introduction of sewage sludge significantly increased the content of all phosphate fractions in the arable soil horizon by 1.2–1.6 times. An increase in calcium phosphates was observed up to a depth of 80 cm, the content of aluminum and iron phosphates up to 100 cm. The use of cattle manure had a lesser effect on the mineral composition of phosphates than sewage sludge. The application of NPK during five rotations of the field seven-field crop rotation increased the content of all groups of mineral phosphates in the plow horizon of the soil by 1.4–3.6 times. An increase in calcium phosphates was noted throughout the entire 1-meter soil layer, the Fe-P content in the 0–40 cm layer. The Al-P content decreased by 27–32% with depth. Long-term application of organic and mineral fertilizers had a positive effect on the content of mobile phosphorus in the soil and the degree of phosphate mobility. An increase in the reserves of mobile phosphorus was noted in the arable soil horizon and the meter layer.

**Key words:** sod-podzolic soil, fractional composition of mineral phosphates, mobile phosphorus, degree of phosphate mobility, manure, sewage sludge, mineral fertilizers.

УДК 631.43:631.445.24

## АГРОГЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ГЛЕЕВАТОЙ ГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ (ALBIC RETISOLS) С РЕГУЛИРУЕМЫМ ВОДНО-ВОЗДУШНЫМ РЕЖИМОМ

© 2021 г. А. В. Литвинович<sup>1</sup>, \*, А. В. Лаврищев<sup>2</sup>, В. М. Буре<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт  
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный аграрный университет  
196601 Санкт-Петербург, Петербургское шоссе, 2, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

\*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.12.2020 г.

После доработки 15.02.2021 г.

Принята к публикации 10.04.2021 г.

Проведено изучение изменения состава и свойств дерново-подзолистой глеевато-глинистой пылевато-иловатой почвы в процессе окультуривания и длительного сельскохозяйственного использования. Представлены материалы морфологического строения, содержания и соотношения закисных и окисных форм железа в профиле целинной и пахотной осушенной почвы. Прослежены изменения органо-профиля в процессе длительного агрогенеза. Выявлено влияние агрогенеза на консервативные свойства почвы — ее гранулометрический состав, содержание и соотношение фракций в составе мелкозема, их миграции и распределения в профиле. Разработаны эмпирические модели, описывающие трансформацию тонкодисперсных фракций в процессе природного и агрогенного почвообразования. Подчеркнуто, что при выведении почв из хозяйственного оборота положительные изменения, достигнутые в результате окультуривания, постепенно утрачиваются. Повторное распаивание и вовлечение почв данного генезиса в культуру из-за высоких затрат на вторичное окультуривание и поддержание оптимального гидрологического режима с хозяйственной точки зрения представляется нецелесообразным.

**Ключевые слова:** дерново-подзолистые глинистые почвы, агрогенная эволюция, тонкодисперсные фракции, органо-минеральный профиль, эмпирические модели.

**DOI:** 10.31857/S0002188121070073

### ВВЕДЕНИЕ

Почвы, сформированные на ленточных глинах, широко распространены на западе и северо-западе России в районах озер Онежского, Ладожского, Ильмень и др. Изучением процессов почвообразования в этих почвах занимались в разные годы [1–10]. На сегодняшний день в литературе накоплен определенный фактический материал, посвященный изменению консервативных свойств почв данного генезиса под влиянием длительного агрогенеза (валового химического, гранулометрического и минералогического составов).

Тем не менее, эти сведения нельзя считать до конца исчерпывающими. Например, считается установленным, что в процессе почвообразования в глинистых почвах проходят процессы химического разрушения и физического дробления

частиц мелкозема [6, 8], что может приводить к пополнению запаса илистой фракции (“илообразованию”), однако математические модели описания этого процесса не разработаны. Нельзя также считать достаточно полными данные о вкладе тонкодисперсных фракций дерново-подзолистых глееватых глинистых почв в закрепление гумусовых веществ.

Характерной особенностью гидротермического режима дерново-подзолистых глееватых глинистых почв на ленточных глинах является сезонное переувлажнение и связанное с этим развитие глеевого процесса. В образовании глея главную роль играют процессы восстановления железа при разложении органических веществ в условиях обилия влаги и недостатка кислорода воздуха [11]. При прокладке дренажа и удаления

избытка влаги процессы восстановления железа ослабевают. Закисные формы железа переходят в окисные. Работы, посвященные установлению содержания и соотношения закисных и окисных форм железа в отдельных горизонтах профиля нативных дерново-подзолистых глееватых глинистых почв и их трансформации при прокладке закрытой дренажной сети и длительном агрогенезе, нам неизвестны.

Глубокий системный кризис, охвативший страну с начала 1990-х гг. прошлого века, стал причиной обвального сокращения сельскохозяйственных земель. На почвах, оставшихся в культуре, резко снизилось количество применяемых удобрений, прекратилось известкование. За прошедшие годы резко ухудшилось состояние мелиорированных земель. Предельные нормативные сроки эксплуатации данных систем истекли. Только 8–17% осушительных систем обеспечивают нормативный режим осушения [12]. Подавляющее количество ранее осушенных глинистых почв выведено из хозяйственного оборота и постепенно зарастает кустарником и деревьями.

Процесс развития сельскохозяйственной отрасли страны на период 2021–2030 гг. предусматривает повторное введение в хозяйственный оборот 12 млн га залежных земель. При этом только сведение древесно-кустарниковой растительности представляется явно недостаточным. Важное значение отводится развитию мелиорации почв с обязательной реконструкцией осушительной системы, применению новых материалов в строительстве дренажа, а также современных технологий удаления и утилизации древесно-кустарниковой растительности.

При принятии решения о возможности вторичного освоения земельных угодий ведущее значение должно принадлежать всесторонней оценке трансформации свойств почв за период активного использования в культуре и хозяйственной целесообразности их повторного распахивания. В задачи исследования входило: установить влияние длительного сельскохозяйственного использования дерново-подзолистой глееватой глинистой почвы на морфологическое строение профиля; определить содержание и соотношение закисных и окисных форм железа в отдельных горизонтах целинной и пахотной осушенной почвы; выявить изменение содержания тонкодисперсных частиц в процессе природного и агрогенного почвообразования; разработать эмпирические модели, описывающие трансформацию тонкодисперсных фракций в профиле почв данного генезиса; рассчитать потери мелкозема из целинной и пахотной глееватых глинистых почв; изучить из-

менение природного органо-профиля в процессе длительной эксплуатации осушенной дерново-подзолистой глееватой глинистой почвы; выявить вклад коллоидной и предколлоидной фракций в закреплении гумусовых веществ; оценить целесообразность повторного распахивания почв данного генезиса после их длительного нахождения в залежи.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления изменений состава и свойств почв в процессе природного почвообразования и длительного агрогенеза использовали сравнительно-географический метод сопряженного изучения целинной и пахотной дерново-подзолистых глееватых глинистых пылевато-иловатых почв, формирующихся в аналогичных геоморфологических условиях на территории Приневской низменности (Ленинградская обл.).

Среднегодовое количество осадков на этой территории составляет 600–650 мм, величина испарения – не более 400 мм. Превышение осадков над испарением является одной из главных причин формирования почв временного избыточного увлажнения. Почвообразующие породы в пределах рассматриваемой территории, сформированные деятельностью ледника, представлены озерно-ледниковыми ленточными глинами. Последние характеризуются большим водопоглощением, малой водоотдачей и водопроницаемостью, что наряду со значительным превышением осадков над испарением и несбалансированностью естественным дренажом, определяет переувлажнение тяжелых по гранулометрическому составу почв и неблагоприятные условия водного, воздушного и питательного режимов.

Пахотная дерново-подзолистая глееватая глинистая почва расположена в 34 км от Санкт-Петербурга (бывший совхоз Детскосельский) и находится в культуре более 200 лет. В 1959 г. проложен гончарный дренаж с расстоянием между дренами 10–12 метров. Глубина закладки дрен 90–100 см. Почву эксплуатировали в 6-польном севообороте с 3-мя полями многолетних трав. Высокий уровень агротехники, характерный для пригородных хозяйств Ленинградской обл., позволил получать в 1976–1980 гг. прошлого века: овощей – 30,8, кормовых корнеплодов – 50,8, сена многолетних трав – 6,5 т/га. Закладку почвенных разрезов проводили в 1983 г. на поле с многолетними травами 2-го года пользования.

В 1989 г. дренаж вышел из строя. С 1990 г. участок короткое время использовали под сенокосы. В настоящее время массив представляет собой

**Таблица 1.** Гранулометрический состав дерново-подзолистой глееватой глинистой почвы, %

| Горизонт | Глубина,<br>см | Размер фракций, мм |           |           |            |             |        |       |
|----------|----------------|--------------------|-----------|-----------|------------|-------------|--------|-------|
|          |                | 1–0.25             | 0.25–0.05 | 0.05–0.01 | 0.01–0.005 | 0.005–0.001 | <0.001 | <0.01 |
| Целина   |                |                    |           |           |            |             |        |       |
| AY       | 3–10           | 4.3                | 21.1      | 24.2      | 20.0       | 18.0        | 12.4   | 50.4  |
| ELg      | 10–20          | 7.8                | 19.9      | 21.6      | 17.1       | 22.6        | 11.0   | 50.7  |
| BTg      | 20–30          | 6.4                | 12.3      | 23.0      | 17.2       | 22.6        | 18.5   | 58.3  |
| BTg      | 30–40          | 6.1                | 12.6      | 23.8      | 16.4       | 21.4        | 19.7   | 57.5  |
| BTg      | 50–60          | 7.0                | 11.7      | 22.0      | 18.2       | 21.7        | 19.4   | 59.3  |
| BTg      | 60–70          | 6.9                | 11.8      | 21.5      | 18.7       | 22.1        | 19.0   | 59.8  |
| BTg      | 70–80          | 7.2                | 10.0      | 22.1      | 22.4       | 19.5        | 18.8   | 60.7  |
| Cg       | 120–130        | 7.4                | 9.8       | 23.0      | 21.5       | 19.4        | 18.9   | 59.8  |
| Пашня    |                |                    |           |           |            |             |        |       |
| P        | 0–10           | 4.9                | 22.1      | 23.2      | 18.9       | 20.9        | 12.0   | 51.8  |
| P        | 10–20          | 4.4                | 23.0      | 23.7      | 18.0       | 21.1        | 11.8   | 50.9  |
| P        | 20–30          | 5.1                | 21.9      | 22.5      | 17.9       | 21.4        | 12.2   | 51.5  |
| BELg     | 30–40          | 7.5                | 15.0      | 23.9      | 15.5       | 16.5        | 21.6   | 54.6  |
| BELg     | 40–55          | 8.4                | 18.9      | 19.7      | 13.2       | 17.5        | 22.3   | 53.0  |
| BTg      | 60–70          | 8.1                | 12.1      | 20.0      | 15.4       | 18.6        | 21.0   | 55.0  |
| BTg      | 80–90          | 8.0                | 10.9      | 23.2      | 19.0       | 18.4        | 20.5   | 57.9  |
| Cg       | 130–140        | 8.6                | 10.7      | 23.2      | 18.6       | 18.8        | 20.1   | 57.5  |

слабозакустаренный разнотравно-злаковый луг, постепенно подвергающийся заболачиванию.

Целинная дерново-подзолистая глееватая глинистая почва расположена в непосредственной близости от пахотной и занята вторичным лесом. Растительный покров представлен ольхой, осинной и березой. Травянистый покров сплошной, с преобладанием осоки.

Данные гранулометрического состава материнских пород свидетельствуют о том, что почвы сформированы на близком по составу материале (табл. 1).

В работе использовали методы, широко применяемые в агрохимии и почвоведении. Для определения объемной массы применяли метод режущих цилиндров. Гранулометрический состав устанавливали методом Качинского, выделение тонкодисперсных фракций – по методу Горбунова. Фракцию <0.001 мм разделяли на предколлоидную и коллоидную с использованием проточной центрифуги С–100 при 20 тыс. об./мин. Суспензию коагулировали HCl. Содержание органических коллоидов определяли весовым методом после озонирования коллоидных частиц в муфеле по разности до и после сжигания. Содержание гумуса устанавливали по методу Тюрина.

Построение моделей трансформации отдельных гранулометрических фракций в составе мелкозема проводили согласно [13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Морфологическое строение профиля.* Строение профиля целинной лесной почвы типично для почв данного генезиса. В верхней части выделяется лесная подстилка (О – 0–3 см), хорошо перемешанная с минеральной массой, ниже расположен маломощный серо-гумусовый горизонт (AY – 3–10 см), однородной темно-серой окраски, густо переплетенный корнями растений. На глубине 10–20 см сформирован подзолистый горизонт (ELg), белесоватого цвета с мелкими сизоватыми прослойками и пятнами оглеения. Ниже, на глубине 20–80 см, находится иллювиально-текстурный глеевый горизонт (BTg). Почвообразующая порода (C) залегает с глубины 80 см.

Развитие и строение пахотной почвы формировалось под влиянием агрогенного процесса почвообразования, ведущая роль в котором, наряду с естественными (природными) факторами почвообразования, принадлежит хозяйственной деятельности человека. Обработка почвы, систематическое внесение удобрений, известкование, чередование культур, инженерные мелиорации

**Таблица 2.** Содержание и распределение закисных и окисных форм железа в дерново-подзолистых глееватых глинистых почвах, %

| Горизонт | Мощность, см | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : FeO |
|----------|--------------|--------------------------------|------|--------------------------------------|
| Целина   |              |                                |      |                                      |
| AY       | 3–10         | 1.65                           | 1.21 | 1.36                                 |
| ELg      | 10–20        | 2.60                           | 1.04 | 2.50                                 |
| BTg      | 30–40        | 2.89                           | 1.44 | 2.01                                 |
| Cg       | 120–130      | 2.53                           | 1.47 | 1.72                                 |
| Пашня    |              |                                |      |                                      |
| P        | 0–30         | 2.32                           | 0.99 | 2.34                                 |
| BEIg     | 40–50        | 3.12                           | 0.69 | 4.52                                 |
| BTg      | 70–80        | 3.03                           | 0.92 | 3.29                                 |
| Cg       | 130–140      | 3.88                           | 0.93 | 4.17                                 |

трансформировали верхнюю часть почвенного профиля на глубину вспашки с образованием пахотного слоя и вовлечением в его состав горизонтов AY, ELg и части почвенной массы горизонта BTg. Пахотный слой (P – 0–30 см) характеризуется равномерным темно-серым прокрашиванием, комковатой структурой, густо пронизан корнями травянистой растительности.

Под влиянием агрогенного почвообразования в профиле пахотной почвы формируется горизонт выноса **BEIg** (30–55 см), который соответствует по глубине залегания верхней части горизонта BTg. Горизонт BTg (55–90 см) пахотной почвы более мощный. Изменение гидрологического режима при прокладке дренажа привело к ослаблению признаков оглеения до глубины закладки дрен. Цветовые признаки оглеения выражены менее ярко и отмечены на большей глубине.

Таким образом, в результате многолетнего использования и окультуривания агрогенной почвы создан мощный, однородный по окраске пахотный горизонт с благоприятной структурой. Увеличение в пахотной почве мощности агрогумусового горизонта (P) повлекло за собой смещение границ других горизонтов. Профиль пахотной почвы более растянут, а процессами почвообразования затронута большая по мощности толща. Прокладка дренажа приводила к ослаблению признаков оглеения до глубины залегания дрен.

Сходное морфологическое строение средней и нижней части профиля целинной и пахотной почв свидетельствовало о развитии в окультуренной почве тех же процессов, что и в целинной почве.

*Содержание и соотношение закисных и окисных форм железа в почвах.* Вследствие сложившихся

водно-воздушных и окислительных условий в глинистых почвах происходит трансформация и перераспределение различных форм железа (табл. 2). Труднорастворимые формы, представленные окристаллизованным и аморфным не силикатным железом, переходят в более мобильные соединения гидроокиси закисного и окисного железа и его простые соли [14]. Изученные почвы характеризуются значительным содержанием закисных форм железа во всей почвенной толще, что придает характерную окраску их профилю. Наибольшее количество закисного железа содержится в лесной почве.

Принято выделять 5 групп соединений закисного железа в почвах, придающих характерную окраску оглееным почвам: водорастворимое ионное или комплексное железо; активное, представленное осажденными нерастворимыми формами и отчасти формами прочно адсорбированными глинистыми минералами; неактивное железо, прочно адсорбированное глинами, а также частично железо минералов и некоторые его нерастворимые формы; не экстрагируемое железо, связанное с глинистыми минералами и входящее в его состав [15].

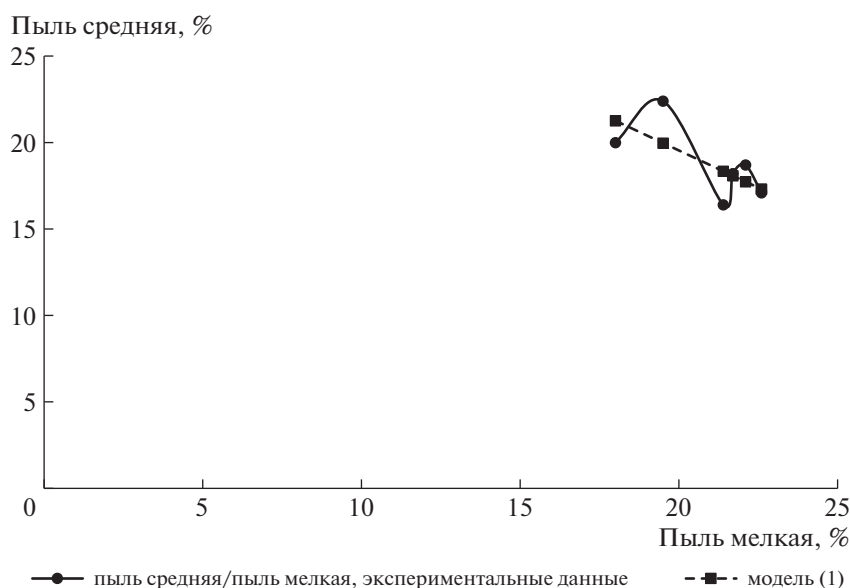
При дренировании переувлажненных почв двухвалентное железо окисляется. Осушение приводит к снижению содержания закисного железа и увеличению его окисной формы. Соотношение окисленной и восстановленной форм железа в пахотной почве расширяется. Цветовые признаки оглеения ослабевают.

Однако полного исчезновения закисных форм железа при дренировании достичь не удалось. Это связано с тем, что не все формы закисного железа легко поддаются окислению. Активное и неактивное железо относятся к устойчивым формам, и даже на воздухе эти формы сохраняют свою специфическую окраску. Для полного исчезновения цветовых признаков оглеения, по-видимому, нужен значительный промежуток времени.

В целом окультуривание и прокладка дренажа приводят к расширению соотношения окисленной и восстановленной форм железа в пахотной почве, что свидетельствует об улучшении водно-воздушного режима и преобладании в профиле процессов окисления. Однако оглеение при осушении почв данного генезиса полностью не устраняется.

*Гранулометрический состав.* Представленные в табл. 1 данные гранулометрического состава показали, что профиль изученных почв довольно отчетливо дифференцирован по содержанию глины и илистой фракции.





**Рис. 1.** Зависимость содержания средней пыли от количества мелкой пыли в профиле целинной дерново-подзолистой глееватой глинистой почвы.

Зона элювиирования в целинной лесной почве охватывает слой 3–20 см (AY и ELg). Вниз по профилю в горизонте BTg содержание ила и физической глины резко возрастает с 11.0 до 18.5 и 50.7 до 58.3% соответственно. Далее, в нижележащих слоях профиля содержание глинистых частиц и илистой фракции имеет выровненный характер.

Длительный агрогенез изменил горизонтальное строение профиля дерново-подзолистой глееватой глинистой почвы. Элювиальным горизонтом является весь пахотный слой (0–30 см), который равномерно обеднен илистыми частицами и фракцией глины. Переходный горизонт BELg, расположенный на глубине 30–55 см и сформированный на месте залегания иллювиального горизонта BTg целинной почвы, также затронут процессами элювиирования. Выявлено уменьшение содержания средней 0.01–0.005 мм и мелкой 0.005–0.001 мм пыли в процессе агрогенного почвообразования. В горизонте BELg количество частиц этих размеров минимально по сравнению со всеми другими слоями почвы.

Убыль фракций мелкой и средней пыли в агрогенной почве вполне может быть вызвана нисходящей миграцией по порам и трещинам с просачивающейся влагой атмосферных осадков. По данным [16], прокладка дренажа, усиливая нисходящий ток влаги, способствует усилению миграции мелкозема из верхних горизонтов профиля. Согласно исследованиям [17], водопроницаемость дерново-подзолистых глееватых почв

под влиянием дренажа, начиная с поверхности, в 1.7–2.0 раза больше, чем не дренированной.

Наоборот, по мнению [6], основным механизмом убыли пылеватых фракций в дерново-подзолистых глинистых почвах является физическое дробление кластогенных глинистых минералов, в том числе триоктаэдрических, каолинита и гидрослюда.

Дробление частиц средней пыли до размера мелкопылевой фракции активно проходит в профиле целинной лесной почвы. Установлена средняя силы отрицательная связь между содержанием средне-пылеватых и мелко-пылеватых частиц в профиле целинной почвы:  $r = -0.72$ . Эмпирическая модель процесса трансформации частиц средней пыли до размера мелко-пылевой фракции описывается уравнением:

$$y = 36.73 - 0.859x, \quad (1)$$

где  $y$  — пыль средняя,  $x$  — пыль мелкая,  $v_1 = -0.859$  — средняя скорость относительного изменения содержания (уменьшения) среднепылевой фракции до размера мелкой пыли на одну единицу.

Эмпирическая модель (1) статистически значима на уровне значимости,  $p = 0.067$  ( $p$ -value по критерию Фишера для эмпирической модели (1)), коэффициент детерминации —  $R^2 = 0.52$ . Следовательно, можно сделать вывод о наличии статистически значимой взаимосвязи между содержанием частиц указанных размеров. График модели (1) представлен на рис. 1.

**Таблица 3.** Баланс фракции <0.001 мм в профиле дерново-подзолистой глееватой почвы

| Горизонт | Мощность,<br>см | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Содержание фракции <0.001 мм |                   | Вынос—<br>накопление*,<br>г/см <sup>3</sup> | Сумма выноса—<br>накопления,<br>кг/м <sup>2</sup> |
|----------|-----------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|          |                 |                                 | % от содержания<br>в почве   | г/см <sup>3</sup> |                                             |                                                   |
| Целина   |                 |                                 |                              |                   |                                             |                                                   |
| AY       | 7               | 1.02                            | 12.4                         | 12.6              | −19.5                                       | −137                                              |
| ELg      | 10              | 1.55                            | 11.0                         | 17.0              | −15.1                                       | −151                                              |
| BTg      | 38              | 1.68                            | 19.1                         | 32.1              | 0                                           | 0                                                 |
| Cg       | —               | 1.70                            | 18.9                         | 32.1              | —                                           | —                                                 |
| Пашня    |                 |                                 |                              |                   |                                             |                                                   |
| P        | 30              | 1.29                            | 12.0                         | 15.5              | −19.0                                       | −570                                              |
| BELg     | 25              | 1.64                            | 21.9                         | 32.9              | +1.4                                        | +35.0                                             |
| BTg      | 45              | 1.71                            | 20.7                         | 35.4              | +0.9                                        | +40.5                                             |
| Cg       | —               | 1.72                            | 20.1                         | 34.5              | —                                           | —                                                 |

\*Расчет проведен для равных по мощности слоев по сравнению с материнской породой. То же в табл. 4.

**Таблица 4.** Баланс фракции <0.01 мм в профиле дерново-подзолистой глееватой глинистой почвы

| Горизонт | Мощность,<br>см | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Содержание фракции <0.01 мм |                   | Вынос—<br>накопление*,<br>г/см <sup>3</sup> | Сумма выноса—<br>накопления,<br>кг/м <sup>2</sup> |
|----------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|          |                 |                                 | % от содержания<br>в почве  | г/см <sup>3</sup> |                                             |                                                   |
| Целина   |                 |                                 |                             |                   |                                             |                                                   |
| AY       | 7               | 1.02                            | 50.4                        | 51.4              | −50.3                                       | −352                                              |
| ELg      | 10              | 1.55                            | 50.7                        | 78.6              | −42.6                                       | −426                                              |
| BTg      | 38              | 1.68                            | 59.1                        | 99.3              | −2.4                                        | −90.0                                             |
| Cg       | —               | 1.70                            | 59.8                        | 102               | —                                           | —                                                 |
| Пашня    |                 |                                 |                             |                   |                                             |                                                   |
| P        | 30              | 1.29                            | 51.4                        | 66.3              | −32.6                                       | −978                                              |
| BELg     | 25              | 1.64                            | 53.8                        | 88.2              | −10.7                                       | −267                                              |
| BTg      | 45              | 1.71                            | 56.4                        | 96.4              | −2.5                                        | −111                                              |
| Cg       | —               | 1.72                            | 57.5                        | 98.9              | —                                           | —                                                 |

Подсчет коэффициента корреляции между содержанием средней пыли и илистой фракции, а также мелкой пыли и частицами ила не выявил достоверной связи между ними. Однако это не значит, что процессы физического дробления и химического разрушения пылеватых фракций в профиле целинной лесной почвы задерживаются на стадии пыль средняя—пыль мелкая и не приводят к пополнению содержания илстых частиц. Вероятно, что соотношение поступления ила в результате “илообразования” и нисходящей его миграции в растворах и суспензиях складывается в целинной лесной почве в пользу последнего.

Проведенное в работе [6] изучение подфракций ила показало преобладание водно-пептизируемого ила (>90%). Расчет баланса фракций <0.001 и <0.01 мм, выполненный для целинной

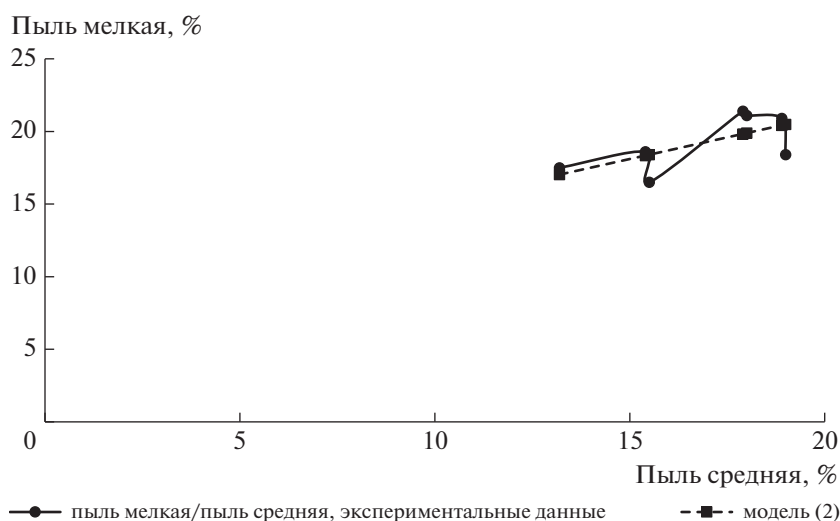
лесной почвы, показал (табл. 3, 4), что суммарные потери глинистых частиц из элювиальной толщи составили 877, илистой фракции – 288 кг/м<sup>2</sup>. Иллювиального накопления физической глины и ила не выявлено.

Линейная эмпирическая модель (2) зависимости содержания пыли мелкой от пыли средней для пахотной почвы описывается уравнением:

$$y = 9.16 + 0.596x_1, \quad (2)$$

где  $y$  – пыль мелкая,  $x_1$  – пыль средняя.

Эмпирическая модель (2) статистически значима на уровне значимости  $p = 0.099$  ( $p$ -value по критерию Фишера для эмпирической модели (2)), коэффициент детерминации  $R^2 = 0.45$ .



**Рис. 2.** Зависимость содержания пыли мелкой от пыли средней в профиле пахотной дерново-подзолистой глееватой глинистой почвы.

Следовательно, для пахотной почвы также выявлена статистически значимая зависимость содержания в профиле пыли мелкой от пыли средней. График модели (2) представлен на рис. 2.

Процесс физического дробления и химического разрушения пылеватых фракций в пахотной почве действует наиболее активно. Об этом свидетельствует резкое уменьшение содержания фракций средней и мелкой пыли, начиная с глубины 30–40 см. Одновременно на этой глубине установлен рост содержания илистой фракции (табл. 1).

Выявлена достоверная средней силы отрицательная связь содержания средней пыли и илистой фракции ( $r = -0.67$ ) и практически линейная отрицательная связь между содержанием мелкой пыли и илистыми частицами ( $r = -0.95$ ) в профиле осушенной почвы.

Линейная эмпирическая модель (3) зависимости содержания ила от пыли средней для пахотной почвы описывается уравнением:

$$y = 43.99 - 1.58x_1, \quad (3)$$

где  $x_1$  — пыль средняя.

Эмпирическая модель (3) статистически значима на уровне значимости  $p = 0.089$  ( $p$ -value по критерию Фишера для эмпирической модели (3)), коэффициент детерминации  $R^2 = 0.47$ . График модели (3) представлен на рис. 3.

Линейная эмпирическая модель (4) зависимости содержания ила от мелкопылеватой фракции для пахотной почвы описывается уравнением:

$$y = 64.72 - 2.47x_2, \quad (4)$$

где  $x_2$  — пыль мелкая.

Эмпирическая модель (4) статистически значима на очень высоком уровне значимости,  $p = 0.001$  ( $p$ -value по критерию Фишера для эмпирической модели (4)), коэффициент детерминации  $R^2 = 0.903$ . График модели (4) представлен на рис. 4.

Линейная эмпирическая модель (5) зависимости содержания ила от двух факторов — пыли средней и пыли мелкой для пахотной почвы описывается уравнением:

$$y = 65.2 - 0.2x_1 - 2.3x_2, \quad (5)$$

где  $x_1$  — пыль средняя,  $x_2$  — пыль мелкая.

Эмпирическая модель (5) статистически значима на очень высоком уровне значимости,  $p = 0.008$  ( $p$ -value по критерию Фишера для эмпирической модели (5)), коэффициент детерминации  $R^2 = 0.907$ .

Эмпирические модели (4) и (5) обладают очень высоким уровнем значимости. Следовательно, содержание ила в профиле пахотной осушенной почвы сильно связано с содержанием пыли мелкой и в меньшей степени с содержанием пыли средней (статистическая значимость модели (3) меньше, чем статистическая значимость модели (4)).

Вероятно, в результате разрушения в профиле пахотной почвы частиц средней пыли идет пополнение преимущественно мелкопылеватых частиц, которые, в свою очередь, разрушаясь, пополняют запас илистой фракции. Таким образом,

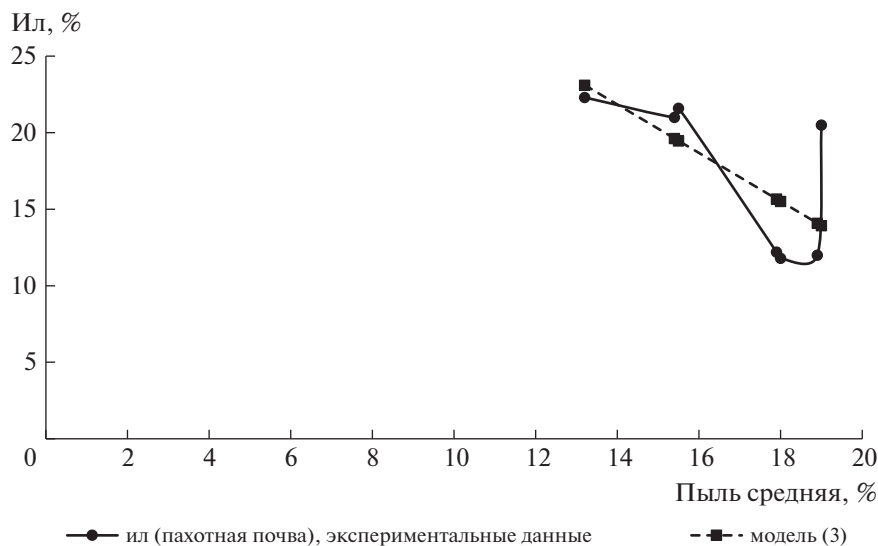


Рис. 3. Зависимость содержания ила от пыли средней в профиле пахотной почвы.

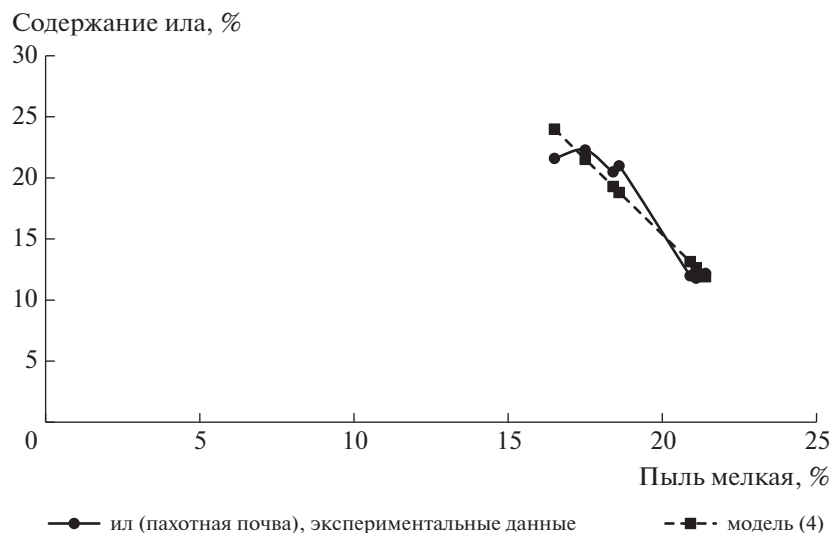


Рис. 4. Содержание ила в зависимости от количества мелкой пыли в профиле пахотной почвы.

можно говорить о “стадийности” процесса трансформации пылеватых частиц до размера илистой фракции. Следовательно, для построения модели содержания ила для пахотной почвы достаточно информации о трансформации мелкопылевой фракции.

Таким образом, процесс физического дробления и химического разрушения (диспергации) пылеватых фракций проходит в обеих почвах. Однако интенсивность этих процессов в профиле осушенной почвы длительного сельскохозяйственного использования больше. Элювиальные потери физической глины и ила при длительном агрогенезе и прокладке дренажа усиливаются.

Об этом свидетельствует сдвиг иллювиального максимума ила (заглубление иллювиальной толщи) вниз от границы пахоты (табл. 1). Убыль глинистых частиц из горизонтов P и BELg составила  $1240 \text{ кг/м}^2$  (табл. 4). Потери илистой фракции равны  $570 \text{ кг/м}^2$  (табл. 3).

Таким образом, в пахотной осушенной почве процессы разрушения частиц глины и илистой фракции в иллювиальной толще не только не ослабевают, но, напротив, усиливаются. Это тем более очевидно, если иметь в виду, что пахотный слой в процессе своего создания был обогащен мелкоземом из верхней части иллювиальной толщи целинной почвы и испытывал регулярный

**Таблица 5.** Содержание коллоидной фракции в дерново-подзолистых глееватых почвах, %

| Горизонт | Глубина, см | Всего в почве | В том числе |              | Соотношение<br>органические : минеральные |
|----------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------------------------------------|
|          |             |               | минеральных | органических |                                           |
| Целина   |             |               |             |              |                                           |
| AY       | 3—10        | 2.0           | 1.44        | 0.56         | 0.38                                      |
| ELg      | 10—20       | 1.5           | 1.10        | 0.40         | 0.36                                      |
| BTg      | 30—40       | 4.1           | 3.79        | 0.31         | 0.08                                      |
| Cg       | 120—130     | 6.0           | 5.92        | 0.08         | 0.01                                      |
| Пашня    |             |               |             |              |                                           |
| P        | 0—30        | 2.5           | 2.15        | 0.35         | 0.16                                      |
| BELg     | 40—50       | 7.6           | 7.32        | 0.28         | 0.03                                      |
| BTg      | 70—80       | 7.6           | 7.42        | 0.18         | 0.02                                      |
| Cg       | 130—140     | 7.5           | 7.43        | 0.07         | 0.01                                      |

привнос удобрений и извести. В результате происходило уменьшение содержания частиц средней и мелкой пыли с одновременным обогащением иллювиальной толщи илистой фракцией. Иллювиальное накопление ила в горизонтах BELg и BTg было равно соответственно 35.0 и 40.5 кг/м<sup>2</sup> (табл. 3).

Вероятно, что в данной части профиля процессы поступления ила в результате миграции из верхних слоев и “илообразование” в результате физического дробления и химического разрушения пылеватых фракций компенсируют его вынос в растворах и суспензиях, что приводит к росту содержания илистой фракции в иллювиальных слоях.

Постоянное пополнение илом и без того тяжелой массы подпахотного слоя является негативным явлением, поскольку приводит к кольматации (заиливанию) этих горизонтов. Нарушается перераспределение влаги в глубокие горизонты профиля. Сокращается сеть трещин, созданных при рыхлении. Усиливается роль иллювиальной толщи как водопора. Все это приводит к необходимости регулярного проведения глубокого мелиоративного рыхления осушенных глееватых глинистых почв, положительное влияние которого исчерпывается через 1 год [16].

Содержание и распределение коллоидной фракции в профиле изученных почв приведено в табл. 5. Показано, что характер распределения коллоидной фракции в профиле почв определяется ходом и развитием почвообразовательного процесса и идентичен распределению илистой фракции. Верхняя часть профиля целинной лесной почвы в значительной степени обеднена коллоидными частицами. Минимальное содержание характерно для подзолистого горизонта. В соста-

ве коллоидов по всему профилю доминирует минеральная фракция. На долю органических коллоидов в горизонте AY приходится 28% коллоидных частиц. Вниз по профилю их абсолютное содержание постепенно снижается. Распределение минеральных коллоидов в профиле целинной почвы носит элювиально-иллювиальный характер.

Профиль пахотной осушенной почвы богаче своего целинного аналога по общему содержанию коллоидов. Суммарное количество коллоидных частиц в пахотном слое равно 2.5%. На долю органических коллоидов приходится 14% от общего содержания. Это в 2 раза меньше, чем их содержание в горизонте AY целинной почвы. Таким образом, процессы выноса органической части коллоидных частиц при вовлечении почвы в культуру и прокладке дренажа проходят довольно интенсивно. По данным [18], в отдельные периоды дренажного стока концентрация органических веществ в нем может достигать 1.4 г/л.

На глубине 40–50 см общее содержание коллоидных частиц возрастает до 7.6% и мало изменяется с глубиной. В составе коллоидов преобладает минеральная фракция. Так же, как и в целинной, в пахотной почве содержание органических коллоидов с глубиной снижается.

Процесс разрушения коллоидального комплекса развит в обеих почвах. Данное положение хорошо иллюстрирует подсчет выноса–накопления коллоидных частиц в профиле сравниваемых почв (табл. 6). Результаты свидетельствуют, что длительное нахождение почвы в культуре привело к усилению разрушения и выноса коллоидных частиц. Например, если суммарные потери коллоидов из всего профиля целинной почвы равны

**Таблица 6.** Баланс фракции <0.0002 мм в профиле дерново-подзолистой глееватой почвы

| Горизонт | Мощность,<br>см | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Содержание фракции <0.0002 мм |                   | Вынос—<br>накопление, г/см <sup>3</sup> | Сумма выноса—<br>накопления, кг/м <sup>2</sup> |
|----------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|
|          |                 |                                 | % от содержания<br>в почве    | г/см <sup>3</sup> |                                         |                                                |
| Целина   |                 |                                 |                               |                   |                                         |                                                |
| AY       | 7               | 1.02                            | 2.0                           | 2.04              | −8.16                                   | −57.1                                          |
| ELg      | 10              | 1.55                            | 1.5                           | 2.32              | −7.88                                   | −78.8                                          |
| BTg      | 38              | 1.68                            | 4.1                           | 6.88              | −3.32                                   | −126                                           |
| Cg       | —               | 1.70                            | 6.0                           | 10.2              | —                                       | —                                              |
| Пашня    |                 |                                 |                               |                   |                                         |                                                |
| P        | 30              | 1.29                            | 2.5                           | 3.23              | −9.67                                   | −290                                           |
| BELg     | 25              | 1.64                            | 7.6                           | 12.5              | −0.40                                   | −10.0                                          |
| BTg      | 45              | 1.71                            | 7.6                           | 12.9              | 0                                       | 0                                              |
| Cg       | —               | 1.72                            | 7.5                           | 12.9              | —                                       | —                                              |

**Таблица 7.** Запасы коллоидов в целинных и пахотных дерново-подзолистых глееватых почвах, т/га

| Угодье | 0–30 см | 0–50 см | Вынос (–), накопление (+) по сравнению с равным слоем материнской породы |      |         |      |
|--------|---------|---------|--------------------------------------------------------------------------|------|---------|------|
|        |         |         | 0–30 см                                                                  | %    | 0–50 см | %    |
| Целина | 108     | 246     | –204                                                                     | 65.4 | –274    | 52.8 |
| Пашня  | 96.7    | 346     | –290                                                                     | 75.0 | –299    | 46.3 |

262 кг/м<sup>2</sup>, то из пахотного слоя осушенной почвы потери составили 290 кг/м<sup>2</sup>.

Эти данные подтверждает подсчет запасов коллоидной фракции в слоях 0–30 и 0–50 см почв (табл. 7). Абсолютные потери коллоидных частиц из слоя 0–30 см в целинной почве составили 204 т/га и возросли до 290 т/га в пахотной осушенной почве. Потери из слоя 0–50 см составили 274 и 299 т/га соответственно. Следовательно, длительное (>200 лет) сельскохозяйственное использование глееватой глинистой осушенной почвы приводило к усилению разрушения и выноса за пределы пахотного горизонта не только илстой фракции, но и коллоидных частиц.

Возникает вопрос, какова интенсивность процесса выноса илстой и коллоидной фракций при окультуривании и прокладке дренажа? Вероятно, эти процессы происходят достаточно энергично. Например, по данным [16], вынос ила в почвах данного генезиса при прокладке закрытой осушительной сети проходит “взрывообразно”. Уже на 3-й год обратная засыпка дрен оказывается заиленной. Кроме того, часть ила оседает в дренажных трубах, что сокращает срок эксплуатации дренажной системы. Очевидно, интенсивное разрушение и вынос тонкодисперсных фракций из элювиальной толщи в растворах и суспензиях при

окультуривании и прокладке дренажа являются необратимыми последствиями агрогенеза.

**Органо-профиль.** Характерной особенностью гумусового профиля целинной дерново-подзолистой глееватой глинистой почвы является приуроченность максимального содержания органического вещества к верхнему органо-генному горизонту и его резкое уменьшение непосредственно на границе перехода серогумусового (AY) горизонта к элювиальному (EL). В горизонте AY целинной почвы содержание гумуса высокое – 4.9%. При переходе от горизонта AY к горизонту EL гумусированность резко снижается до 0.9%. Вниз по профилю отмечено дальнейшее постепенное снижение содержания гумуса (табл. 8).

Содержание гумуса в пахотном слое окультуренной почвы уступает его содержанию в горизонте AY целинной почвы. В толще пахотного слоя (слои 0–10, 10–20 и 20–30 см) распределение гумуса равномерное. Изменения составляют от 3.31 до 3.40%. На глубине 30–40 см при переходе к горизонту BEL содержание гумуса резко снижается до 0.6%.

Следовательно, в агрогенной почве общий характер распределения гумуса сохраняется, но в пахотном слое его содержание значительно меньше, чем в целинной лесной почве. Окультуриваю-

**Таблица 8.** Содержание гумуса в предколлоидной и коллоидной фракциях дерново-подзолистых глееватых почв, %

| Горизонт | Глубина,<br>см | Содержание<br>гумуса<br>в почве, % | Размер<br>фракции, мм | Содержание<br>фракции, % | От массы |                   | От содержания<br>гумуса в почве |
|----------|----------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------|----------|-------------------|---------------------------------|
|          |                |                                    |                       |                          | фракции  | исходной<br>почвы |                                 |
| Целина   |                |                                    |                       |                          |          |                   |                                 |
| AY       | 3—10           | 4.90                               | 0.001—0.0002          | 10.4                     | 6.1      | 0.63              | 12.8                            |
|          |                |                                    | <0.0002               | 2.00                     | 28.5     | 0.56              | 11.6                            |
| ELg      | 10—20          | 0.90                               | 0.001—0.0002          | 9.5                      | 1.2      | 0.10              | 12.1                            |
|          |                |                                    | <0.0002               | 1.50                     | 11.3     | 0.16              | 18.4                            |
| BTg      | 30—40          | 0.40                               | 0.001—0.0002          | 15.0                     | 0.9      | 0.13              | 33.3                            |
|          |                |                                    | <0.0002               | 4.10                     | 5.8      | 0.23              | 59.3                            |
| Cg       | 120—130        | 0.25                               | 0.001—0.0002          | 12.9                     | 0.9      | 0.11              | 44.7                            |
|          |                |                                    | <0.0002               | 6.00                     | 1.1      | 0.06              | 28.7                            |
| Пашня    |                |                                    |                       |                          |          |                   |                                 |
| P        | 0—30           | 3.36                               | 0.001—0.0002          | 9.5                      | 6.3      | 0.60              | 17.8                            |
|          |                |                                    | <0.0002               | 2.5                      | 14.7     | 0.36              | 10.9                            |
| BELg     | 40—50          | 0.60                               | 0.001—0.0002          | 14.3                     | 1.5      | 0.21              | 36.3                            |
|          |                |                                    | <0.0002               | 7.6                      | 1.9      | 0.15              | 24.6                            |
| BTg      | 70—80          | 0.24                               | 0.001—0.0002          | 13.1                     | 1.0      | 0.14              | 48.5                            |
|          |                |                                    | <0.0002               | 7.6                      | 1.2      | 0.14              | 33.7                            |
| Cg       | 130—140        | 0.22                               | 0.001—0.0002          | 12.6                     | 1.0      | 0.13              | 57.3                            |
|          |                |                                    | <0.0002               | 78.5                     | 1.1      | 0.08              | 37.4                            |

шее влияние агротехники проявляется в том, что в процессе эксплуатации создается глубокогумусированный агрогумусовый горизонт (P), значительно превосходящий по мощности серогумусовый горизонт (AY) целинной почвы.

Таким образом, агрогенная трансформация органо-профиля проявляется в увеличении мощности гумусированного слоя и возрастании запасов гумуса в равных по мощности слоях. В пахотной почве в слое 0–30 см запасы гумуса составляют 130 т/га, в слое 0–50 см – 150 т/га, в целинной почве в слое 0–30 см – 56.4 т/га, в слое 0–50 см – 71.5 т/га.

Содержание гумуса в предколлоидной фракции серогумусового горизонта составляет 6.1% от массы фракции, что равно 12.8% от общего содержания гумуса в почве. В нижних горизонтах профиля содержание гумуса, закрепляемого предколлоидами, снижается и меняется от 1.2 до 0.9%. На долю гумуса предколлоидной фракции в горизонте ELg приходится 12.1%, в горизонте BTg – 33.3% от его общего содержания в почве.

Абсолютное количество гумуса, связанного с коллоидной фракцией, превосходит содержание, закрепляемого предколлоидами. Выявленная закономерность характерна для всех горизонтов профиля целинной лесной почвы. Доля связан-

ного с коллоидными частицами гумуса от его общего содержания в почве этих горизонтов составляет 11.6% в горизонте AY, 18.4% – в горизонте EL и 59.3% – в горизонте BTg. Таким образом, с уменьшением размера частиц их роль в закреплении органического вещества в подпахотной части профиля возрастает.

Суммарный вклад тонкодисперсных частиц (коллоидов и предколлоидов) в связывании гумуса целинной почвы составил: в горизонте AY – 24.4, в горизонте ELg – 30.5 и в горизонте BTg – 92.6%. Следовательно, роль тонкодисперсных частиц в закреплении гумуса в целинной лесной почве с глубиной возрастает.

Длительное окультуривание и осушение не повлияло на абсолютное содержание гумуса, закрепляемого на поверхности предколлоидных частиц пахотной почвы. В культивируемом слое его содержание составило 6.3, в горизонте BEL – 1.9 и в горизонте BT – 1.2% от массы фракции, мало отличаясь от содержания в аналогичных горизонтах целинной почвы. Вместе с тем относительное количество гумуса предколлоидной фракции от его общего содержания в агрогенной почве по сравнению с целинной возросло и составило в пахотном слое 17.8, в горизонте BELg – 36.3%, т.е. увеличилось соответственно в 1.4 и 3.0 раза. Ис-

ключение составляет горизонт ВТg, где его содержание было меньше, чем в аналогичном горизонте целинной почвы. Таким образом, относительный вклад предколлоидных частиц в закреплении гумуса при окультуривании глинистой почвы возрастает.

При несколько большем содержании коллоидной фракции в пахотном слое окультуренной почвы по сравнению с горизонтом АУ целинной (2.5 и 2.0% соответственно), обогащенность гумусом коллоидов пахотной почвы оказалось в 2 раза меньше, чем в целинной. Однако относительная доля участия коллоидов целинной и пахотной почвы в фиксации гумуса оказалась одинаковой (11.6 и 10.9% соответственно).

В нижних горизонтах профиля абсолютное содержание гумуса в составе коллоидов пахотной почвы снижается, а доля участия в закреплении общего гумуса почвы возрастает. Суммарный вклад коллоидной и предколлоидной фракций в закреплении гумуса в отдельных горизонтах профиля составил: Р – 28.7, ВЕLg – 60.9, ВТg – 82.2%. Таким образом, общий вклад тонкодисперсных фракций (коллоидной и предколлоидной) в закреплении гумуса в пахотном слое оказался выше, чем в серогумусовом горизонте целинной почвы.

Дерново-подзолистые почвы на ленточных глинах – один из наиболее сложных объектов для мелиорации и сельскохозяйственного использования в Нечерноземной зоне России. В 1960–1980 гг. почвы данного генезиса являлись частым объектом дренажа [16]. Необходимость и хозяйственная целесообразность мелиоративных мероприятий в связи с большими трудоемкостью и затратами на окультуривание и эксплуатацию почв данного генезиса и использование их под пашню ранее неоднократно ставилось под сомнение [8, 16, 19, 20].

Дренирование почв на ленточных глинах безусловно оказывает определенное положительное влияние на режим влажности и верховодки этих почв. Однако гидрологический режим влажности дренированных почв на ленточных глинах является весьма неустойчивым для ведения сельскохозяйственного производства [16]. В дренированных почвах на ленточных глинах необходимый гидрологический эффект может быть достигнут только в случае выполнения специального, достаточно сложного и регулярно проводимого комплекса мероприятий, обеспечивающего организацию и ускорение поверхностного стока, и сброс внутрпочвенной влаги дренажными линиями. Положительное влияние на водный ре-

жим этих почв достигается только в результате одновременно проводимых гидротехнических, агромелиоративных, и агрономических мероприятий. В их числе – регулярное, глубокое мелиоративное рыхление (не реже 1 раза в 2 года), проводимое на глубину 60–90 см, поверхностное агротехническое рыхление легкими орудиями на глубину 40–50 см, мероприятия по окультуриванию. Чем выше уровень земледелия, тем более глубокие изменения будут претерпевать осушенные почвы и тем более благоприятные условия создаются для работы дренажа.

Долговременное использование земель под пашню хотя и приводит к глубокой трансформации экосистем, но не устраняет возможность возвращения их к исходному состоянию после прекращения или ослабления антропогенной нагрузки [21, 22]. Почти все благоприятные свойства, созданные агрогенным воздействием, являются обратимыми. Достигнутый уровень плодородия является следствием того уровня антропогенного воздействия, результатом которого он явился [23]. Учитывая большие затраты на повторное окультуривание, длительность этого процесса, невозможность без повторного осушения в полной мере регулировать водно-воздушный режим почв данного генезиса, хозяйственная целесообразность повторного распаивания этих почв не велика.

Например, по данным [8], при направленном окультуривании тяжелых глинистых почв на ленточных глинах южной тайги Северо-Запада России за период 20–25 лет удалось создать лишь “полуокультуренные” пахотные почвы. В пахотном слое, несмотря на гомогенность и положительные изменения ряда свойств, сохранились или усилились неблагоприятные физические и водно-физические свойства. Гумус остался подвижным. В подпахотной части (даже при осушении) сохранились оглеенные горизонты, являющиеся относительным водоупором. Это в значительной мере затруднило развитие окультуривания.

Наиболее целесообразным является использование этих почв под луговые и сенокосные угодья. Представляется также уместным оставление этих ареалов для формирования на них лесных массивов.

## ВЫВОДЫ

1. В результате многолетнего использования и окультуривания дерново-подзолистой глееватой глинистой почвы создается однородный по окраске мощный пахотный слой. Профиль пахотной почвы более растянут, а процессами почво-



образования затронута большая по мощности толща. Прокладка дренажа, регулируя сток избытка влаги, наряду с агромелиоративными мероприятиями приводит к улучшению водно-воздушного режима. Соотношение окисных форм железа к закисным расширяется.

2. Зона элювиирования мелкозема и илистой фракции в целинной почве охватывает слой 3–20 см (гор. АУ и ЕLg). Процессами элювиирования в пахотной почве затронута большая по мощности толща.

3. Потери глинистых частиц (фракция <0.01 мм) из элювиальной толщи целинной почвы равны 877, вынос ила – 288 кг/м<sup>2</sup>. Длительный агрогенез приводит к усилению элювиальных потерь частиц мелкозема. Убыль глинистых частиц из горизонтов Р и ВЕLg составил 1240, ила – 570 кг/м<sup>2</sup>. Суммарные потери коллоидов из всего профиля целинной почвы равны 262, из пахотного слоя осушенной почвы – 290 кг/м<sup>2</sup>. Потери из слоев 0–30 и 0–50 см в целинной почве равны 204 и 274 т/га, из соответствующих слоев пахотной почвы – 274 и 299 т/га.

4. Максимальное содержание гумуса в целинной почве приурочено к верхнему серогумусовому горизонту – 4.9%. При переходе к горизонту ЕLg оно резко снижается до 0.9%. Вниз по профилю наблюдается дальнейшее снижение содержания гумуса. В пахотном слое осушенной почвы содержание гумуса по сравнению с горизонтом АУ целинной почвы снижается, но мощность гумусированной толщи увеличивается. В целинной почве запасы гумуса в слое 0–30 см равны 56.4, в слое 0–50 см – 71.5 т/га. В пахотной почве они возрастают до 130 и 150 т/га соответственно.

5. Содержание гумуса в предколлоидной фракции серогумусового горизонта целинной почвы равно 6.1%, в горизонте ЕLg – 1.2%, в горизонте ВТg – 0.9% (6.1, 12.1 и 33.9% от общего содержания гумуса в почве). Доля гумуса, связанного с коллоидными частицами от его общего содержания в почве, составляет в горизонте АУ – 11.6, в горизонте ЕLg – 18.4, в горизонте ВТg – 59.3%. Окультуривание осушенной глинистой почвы не повлияло на абсолютное содержание гумуса, закрепляемого предколлоидными частицами. Содержание составило: горизонт Р – 6.3, горизонт ВЕLg – 1.9, горизонт ВТg – 1.2% от массы фракции. Относительное количество гумуса предколлоидной фракции в горизонтах Р и ВЕLg по сравнению с аналогичными горизонтами целинной почвы возросло и составило 17.8 и 36.3%, т.е. увеличилось соответственно в 1.4 и 3.0 раза.

6. Обогащенность гумусом коллоидов горизонта Р пахотной почвы в 2 раза меньше, чем горизонта АУ. Относительная доля участия коллоидов в закреплении гумуса почвой оказались одинаковой (11.6 и 10.9% соответственно). В подпахотных горизонтах профиля абсолютное содержание гумуса в составе коллоидов снижается, а доля участия в закреплении гумуса почвой – возрастает.

7. При выведении из хозяйственного оборота почв данного генезиса и отсутствии мероприятий по регулированию водно-воздушного режима положительные изменения, достигнутые в результате окультуривания и осушения, постепенно утрачиваются. Повторное распахивание и вовлечение таких почв в культуру из-за высоких затрат на вторичное окультуривание и поддержание оптимального гидрологического режима с хозяйственной точки зрения представляется нецелесообразным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пестряков В.К. Окультуривание почв Северо-Запада. Л.: Колос, ЛО, 1977. 343 с.
2. Хантулев А.А., Гагарина Э.И., Матинян Н.Н., Счастлива Л.С. Особенности почвообразования на глинах в лесной зоне Советского Союза // Вестн. ЛГУ. 1977. Сер. биол. № 3. С. 125–130.
3. Шоба С.А., Бганцов В.Н., Урусевская И.С., Матинян Н.Н. Микроморфология поверхностно-перевлажненных почв на ленточных глинах // Микроморфологическая диагностика почв и образовательных процессов. М.: Наука, 1983. С. 153–179.
4. Зверева Т.С., Кябелева Г.К., Стрекова А.А., Шаповалова А.Н. Влияние освоения на химический и минералогический состав поверхностно-глеевых почв Карелии // Пути повышения эффективности мелиораций. Петрозаводск, 1990. С. 76–95.
5. Зверева Т.С., Лазарева И.П. О минералогическом составе поверхностно-глеевых почв Карелии // Почвоведение. 1989. № 11. С. 83–93.
6. Гагарина Э.И. Литологический фактор почвообразования (на примере Северо-Запада Русской равнины): Дис. ... д-ра биол. наук. СПб.: СПбГАУ, 1994. 565 с.
7. Матинян Н.Н., Урусевская И.С., Селенков Н.А., Шоба С.А. Особенности почвенного покрова глинистых озерно-ледниковых равнин Валдайского оледенения Северо-Запада РСФСР // Почвоведение. 1983. № 1. С. 12–21.
8. Караваева Н.А. Антропогенные изменения таежных почв на ленточных глинах Северо-Запада России // Почвоведение. 1996. № 11. С. 1285–1294.
9. Караваева Н.А. Длительная агрогенная эволюция дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2000. № 2. С. 169–179.
10. Соколова Т.А., Шоба С.А., Бганцов В.Н., Чернова Г.Н. Преобразование минеральной массы в подзоли-

- стых почвах на озерно-ледниковых глинах // Почвоведение. 1983. № 1. С. 101–112.
11. Кауричев И.С., Ноздрунова Е.П. Общие черты генезиса почв временного избыточного увлажнения // Новое в теории оподзоливания и осолодения почв. М.: Наука, 1964. С. 45–61.
  12. Иванов А.И., Янко Ю.Г. Мелиорация как необходимое средство развития сельского хозяйства Нечерноземной зоны России // Агрофизика. 2019. № 1. С. 67–78.
  13. Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 141 с.
  14. Patrick W.H., Turner F.T. Effect of redox potential on manganese transformation in waterlogged soil // Nature. 1968. V. 220 (5166) P. 476–478. PMID:; <https://doi.org/10.1038/220476a05686162>
  15. Motomura S. Dynamic behavior of ferrous iron in paddy soils // Bull. Natl. Inst. Agric. Sci. 1969. Ser. B 21. P. 1–114.
  16. Зайдельман Ф.Р. Гидрологический режим почв нечерноземной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 328 с.
  17. Миляускас В.В. Влияние дренажа на физические и агрохимические свойства избыточно увлажненных почв Литовской ССР // Почвоведение. 1963. № 2. С. 61–74.
  18. Пестряков В.К., Циприс Д.Б., Шевелев Я.З. Мелиоративное земледелие в пригородной зоне. Л.: Лен-издат, 1979. 148 с.
  19. Дюшофур Ф. Основы почвоведения. Эволюция почв. М.: Прогресс, 1970. 592 с.
  20. Thomasson A.J. Factors influencing the water regimes of gleyed clayey soils in moist temperate regions // Gley and Pseudogley / Eds. Schlichting E., Schwertmann V. Verlag—Chimie, 1973. P. 491–502.
  21. Литвинович А.В. Постагрогенная эволюция хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв северо-запада Нечерноземной зоны // Агрохимия. 2009. № 7. С. 85–93.
  22. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Трансформация состава гумуса дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава под действием возрастающих доз извести и в постагрогенный период // Почвоведение. 2010. № 11. С. 1362–1369.
  23. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Чернов Д.В. Изменение показателей почвенного плодородия и лабильной части гумуса дерново-подзолистой песчаной почвы при интенсивном окультуривании и в условиях хозяйственного истощения // Агрохимия. 2003. № 4. С. 14–21.

## Agrogenic Evolution of Sod-Podzolic Surface-Moistened Clay Soil (Albic retisols) with Adjustable Water-Air Mode

A. V. Litvinovich<sup>a, #</sup>, A. V. Lavrishchev<sup>b</sup>, and V. M. Bure<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup> Agrophysical Research Institute  
Grazhdansky prosp. 14, Saint Petersburg 195220, Russia

<sup>b</sup> St. Petersburg State Agrarian University  
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg 196601, Russia

<sup>c</sup> Sankt-Petersburg State University,  
Universitetskaya nab. 7–9, Saint Petersburg 199034, Russia

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

The study of changes in the composition and properties of sod-podzolic surface-moistened clay soil in the process of cultivation and long-term agricultural use was carried out. The materials of the morphological structure, content and ratio of nitrous and oxide forms of iron in the profile of virgin and arable drained soil are presented. Changes in the organo-profile during long-term agrogenesis are traced. The influence of agrogenesis on the conservative properties of the soil — its granulometric composition, the content and ratio of fractions in the composition of fine-grained soil, their migration and distribution in the profile. Empirical models describing the transformation of fine fractions in the process of natural and agrogenic soil formation have been developed. It is emphasized that when the soil is removed from the economic turnover, the positive changes achieved as a result of cultivation are gradually lost. Re-plowing and involvement of soils of this genesis in the culture due to the high costs of secondary cultivation and maintenance of the optimal hydrological regime from an economic point of view is not appropriate.

**Key words:** sod-podzolic clay soils, agrogenic evolution, fine fractions, organo-mineral profile, empirical models.

УДК 631.84:631.559

## ВКЛАД МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В ФОРМИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР. СООБЩЕНИЕ 1. АЗОТНЫЕ УДОБРЕНИЯ

© 2021 г. С. А. Шафран

*Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова  
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия*

*E-mail: shafran38@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.11.2020 г.

После доработки 11.01.2021 г.

Принята к публикации 10.04.2021 г.

Рассмотрены результаты исследования по влиянию агрохимических свойств почв на вклад азотных удобрений в формирование урожайности основных сельскохозяйственных культур, возделываемых в нашей стране. Показано, что долевое участие азотных удобрений в урожае варьирует в широких пределах и зависит от биологических особенностей культур и агрохимических свойств почв, среди которых наибольшее влияние оказывала степень обеспеченности почв доступными формами азота. Независимо от метода определения по мере увеличения содержания азота в почве резко снижался вклад азотных удобрений в формирование урожайности. При переходе почв из категории низкой обеспеченности почв доступным азотом в повышенную вклад азотных удобрений в формирование урожайности озимой и яровой пшеницы, ярового ячменя на дерново-подзолистых почвах и картофеля на супесчаных почвах снижался в 2 и более раз, картофеля на суглинках — в 1.5 раза. Роль азотных удобрений в формировании урожайности льна-долгунца понижалась по мере увеличения гумусированности почв. При содержании гумуса <1.5% доля влияния азотных удобрений на урожай составляла 15–23%, при 1.5–2.0% — 12–19%, при >2.09 — 14%. Степень участия удобрений в формировании сахарной свеклы менялась от 6 до 18%.

*Ключевые слова:* вклад удобрений, азотные удобрения, агрохимические свойства почвы, минеральный азот, доступные формы азота.

**DOI:** 10.31857/S0002188121070097

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что эффективность минеральных удобрений принято оценивать по прибавкам урожая и по их окупаемости этой прибавкой. Вместе с тем, в отдельных случаях использовали такой показатель, как вклад или долевое участие удобрений в формирование урожайности сельскохозяйственных культур. Данный показатель можно применять не только в чисто познавательных целях, но и в оценке экономической эффективности применения удобрений в условиях производства. Основная трудность такой оценки заключается в том, что определение прибавки урожая от внесения удобрений в каждом сельскохозяйственном предприятии и тем более на каждом поле не представляется возможным и поэтому в таких случаях приходится прибегать к косвенным методам [1], среди которых наиболее приемлемым был признан метод долевого участия удобрений в формирование урожайности сельскохозяй-

ственных культур, на основе которого ЦИНАО разработаны инструкция и нормативы по определению экономической и энергетической эффективности применения удобрений [2]. Опыт работы этого периода показал, что данный метод стали успешно использовать специалисты сельского хозяйства, и он быстро распространился по территории страны. Вместе с тем, апробация показала, что этот метод более точно отражает условия крупных регионов — область, край, республика, экономический район, страна в целом [3].

При определении эффективности удобрений в границах административных районов, сельскохозяйственных предприятий и тем более полей метод долевого участия минеральных удобрений в формировании урожайности не может использоваться, т.к. коэффициенты долевого участия удобрений были разработаны на основе общесюзных нормативов определения потребности в удобрениях, в которых отражены данные только

по экономическим районам и внутри них по природным зонам. Они не были привязаны к типам почв и их агрохимическим свойствам, хотя эти факторы оказывают большое влияние как на урожайность, так и на эффективность удобрений. В целях совершенствования нормативных данных для определения экономической эффективности удобрений в условиях производства предпринимались различные подходы. Например, для условий Московской обл. делали поправку по районам с учетом бонитета почв по отношению к среднеобластному показателю [4]. В республике Беларусь для оценки плодородия почв также был использован бонитировочный балл, в котором отражались природные свойства почв и степень их агрохимической окультуренности. Для определения влияния уровня почвенного плодородия на урожайность основных сельскохозяйственных культур разработаны средние нормативы цены балла почвы. Для этого были использованы данные контрольных вариантов многочисленных полевых опытов Агрохимслужбы и Географической сети БССР [1].

Аналогичный подход был использован Молдавским филиалом ЦИНАО при оценке нормативной оплаты 1 кг д.в. и долевого участия удобрений в урожаях в районах и хозяйствах республики [5]. При этом отмечено, что приведенные примеры относились к периоду интенсивного применения минеральных удобрений в нашей стране. В настоящее время кардинально изменились экономические условия, наметилась устойчивая тенденция повышения цен на минеральные удобрения и снизилась покупательная способность сельхозтоваропроизводителей. В таких условиях внесение удобрений не всегда может окупиться стоимостью прибавки урожая, как это было ранее. Создались более жесткие условия для эффективного применения удобрений и, следовательно, возросли требования к грамотному, рациональному, научно обоснованному их применению. В связи с этим, использование усредненных нормативов потеряло смысл. Учитывая большую вариабельность агрохимических свойств почв не только внутри экономических районов и областей, но и в пределах одного хозяйства, расчеты по таким нормативам могут привести к неверным результатам.

В целях дальнейшего совершенствования нормативно-справочной базы, способствующей более эффективному применению минеральных удобрений, ВНИИА выполнены соответствующие разработки для основных зерновых культур, картофеля, льна-долгунца и сахарной свеклы [6–9]. Исходной информацией для этого послужили

полевые опыты, проведенные научно-исследовательскими учреждениями Геосети ВНИИА и агрохимической службой. Эти исследования позволили оценить влияние азотных, фосфорных и калийных удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур и их окупаемость прибавкой урожая. Наряду с этими показателями большую роль в оценке эффективности удобрений играет такой показатель, как вклад или доленое участие удобрений в формирование урожайности сельскохозяйственных культур, который можно использовать для определения их агрохимической и экономической эффективности в условиях производства.

Цель работы – изучение влияния комплекса агрохимических свойств различных почв на вклад азотных, фосфорных и калийных удобрений на формирование урожайности зерновых культур, картофеля, льна-долгунца и сахарной свеклы. В настоящем сообщении пойдет речь об азотных удобрениях.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Научной основой для выполнения работы были вышеупомянутые разработки, в которых представлены данные урожайности в зависимости от различных доз удобрений. Количество таких вариантов зависело от биологических особенностей культур, почвенных разновидностей и вида удобрений. Наибольшее количество вариантов представлено для азотных удобрений, поскольку на их эффективность оказывает влияние значительно больше факторов по сравнению с фосфорными и калийными. Например, на дерново-подзолистых и серых лесных почвах урожайность озимой пшеницы в контрольных вариантах приведена для 54 вариантов, включая рН, содержание минерального азота, подвижных форм фосфора и калия, для этих вариантов указаны прибавки урожая от азотных удобрений, примененных в 4-х дозах. В то же время, на черноземах и каштановых почвах в перечне агрохимических свойств отсутствуют данные реакции почвенной среды.

На эффективность азотных удобрений, внесенных под лен-долгунец, заметное влияние оказывали такие факторы как содержание гумуса и вид предшественника, и поэтому эти данные были включены в расчеты.

Все эти особенности были учтены при изучении влияния агрохимических свойств почв на вклад минеральных удобрений в формирование урожайности сельскохозяйственных культур.

Вклад или доленое участие удобрений в урожае определяли путем деления величины прибавки урожая на общий урожай. Полученный результат

выражали в %. В тех случаях, когда разница между вариантами составляла незначительную величину (1–2%), полученные данные объединяли.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что в мировом производстве и применении удобрений азотные занимают первое место. В России азот также сыграл важную роль в развитии земледелия. Во второй половине XX века в нашей стране быстрыми темпами стала развиваться промышленность по производству минеральных удобрений, и во все периоды внесение азотных удобрений преобладало над фосфорными и калийными. Даже в перестроечный период, когда наступил резкий спад в применении удобрений, использование азотных удобрений сократилось в меньшей степени по сравнению с фосфорными и калийными. Соотношение вносимых удобрений изменилось в пользу азота, составляя 62–64% от общего применения [10]. Это объясняется тем, что в целом эффективность азотных удобрений значительно выше по сравнению с фосфорными и калийными практически во всех природно-климатических зонах страны. Из результатов многочисленных полевых опытов следует, что при продвижении с севера на юг, хотя и происходило заметное снижение прибавки урожая озимой пшеницы от азота, но при низкой степени обеспеченности черноземных и каштановых почв минеральным азотом и высокой – подвижным фосфором можно получить на каждый 1 кг азота 10–15 кг зерна [10].

Согласно региональным нормативам окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур, на эффективность применения азотных удобрений под зерновые культуры оказывает влияние несколько агрохимических факторов: содержание доступных форм азота, подвижных форм фосфора и калия и реакция почвенной среды в зоне распространения дерново-подзолистых и серых почв [10]. Пользуясь этими данными, был определен вклад азотных удобрений в формирование урожайности основных зерновых культур, возделываемых в нашей стране.

Результаты исследования показали, что наибольшее влияние на долевое участие азотных удобрений в формирование урожайности озимой пшеницы отмечено на дерново-подзолистых почвах в вариантах с низкой степенью обеспеченности минеральным азотом и повышенной и высокой – подвижными формами фосфора и калия, а также на менее кислых почвах. В отдельных вариантах вклад достигал 50% (табл. 1, 2). На серых лесных почвах степень участия азотных удобре-

ний в формировании урожая озимой пшеницы также была достаточно высокой и составляла 31–36%. На черноземах выщелоченных и типичных долевое участие азота в урожае было достаточно высоким, тогда как на черноземах карбонатных и каштановых почвах – намного меньше.

Увеличение содержания минерального азота в почвах значительно снижало вклад азота удобрений в формирование урожайности озимой пшеницы, что можно объяснить с одной стороны меньшей прибавкой урожая, с другой – увеличением урожайности в контрольном варианте.

Влияние долевого участия азотных удобрений в формировании урожая яровой пшеницы в большей степени проявилось на дерново-подзолистых почвах, но гораздо в меньшей степени по сравнению с озимой пшеницей. По мере увеличения содержания подвижных форм фосфора и калия прослежена тенденция увеличения вклада азотных удобрений в формирование урожайности яровой пшеницы. На серых лесных почвах и черноземах выщелоченных долевое участие азотных удобрений оказалось почти в 2 раза меньше, чем для озимой пшеницы. Дозы азотных удобрений несущественно влияли на данный показатель (табл. 3).

Вклад азотных удобрений в формирование урожайности ярового ячменя на дерново-подзолистых почвах возможно было оценить только по степени обеспеченности легкогидролизующим азотом (по методу Корнфилда) и подвижным фосфором. Результаты свидетельствовали о том, что наибольшее влияние на участие азота в продукционном процессе проявилось при различной обеспеченности почв легкогидролизующим азотом (табл. 4). Причем степень этого влияния проявлялась в большей мере по сравнению с озимой пшеницей. При содержании легкогидролизующего азота <100 мг/кг доля участия азотных удобрений в формировании урожая менялась от 24 до 39%, а при содержании >150 мг/кг – 5–10%, т.е. в 4–5 раз меньше. Содержание подвижного фосфора также повлияло на данный процесс, но в меньшей степени по сравнению с содержанием легкогидролизующего азота. Дозы азота, так же как в опытах с озимой пшеницей, не оказали заметного влияния на вклад азотных удобрений в формирование урожайности.

Аналогичные закономерности выявлены также для картофеля, который возделывали на почвах различного гранулометрического состава и генезиса. Результаты исследования свидетельствовали о том, что вклад азотных удобрений в получение урожая картофеля на почвах с низкой

**Таблица 1.** Вклад азотных удобрений в формирование урожайности озимой пшеницы в зависимости от комплекса агрохимических свойств почв, %

| Почвы                                    | Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |           |               |           |               |           |               |           |
|------------------------------------------|------------------------------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|
|                                          | низкое                                   |           |               |           | выше среднего |           |               |           |
|                                          | Содержание K <sub>2</sub> O              |           |               |           |               |           |               |           |
|                                          | низкое                                   |           | выше среднего |           | низкое        |           | выше среднего |           |
|                                          | N30                                      | N60       | N30           | N60       | N30           | N60       | N30           | N60       |
| Низкое содержание минерального азота     |                                          |           |               |           |               |           |               |           |
| Дерново-подзолистые                      | <u>42</u>                                | <u>45</u> | <u>36</u>     | <u>39</u> | <u>38</u>     | <u>41</u> | <u>35</u>     | <u>38</u> |
|                                          | 45                                       | 48        | 40            | 42        | 40            | 44        | 38            | 40        |
| Серые лесные                             | <u>31</u>                                | <u>35</u> | <u>31</u>     | <u>32</u> | <u>33</u>     | <u>36</u> | <u>32</u>     | <u>34</u> |
|                                          | 32                                       | 35        | 31            | 33        | 33            | 36        | 32            | 35        |
| Черноземы                                |                                          |           |               |           |               |           |               |           |
| выщелоченные                             | 27                                       | 27        | 24            | 27        | 22            | 27        | 25            | 28        |
| типичные                                 | 31                                       | 34        | 28            | 30        | 29            | 31        | 27            | 29        |
| обыкновенные                             | 21                                       | 23        | 20            | 22        | 21            | 23        | 20            | 22        |
| карбонатные                              | 15                                       | 17        | 14            | 16        | 14            | 16        | 13            | 15        |
| каштановые                               | 15                                       | 18        | 12            | 14        | 13            | 15        | 12            | 14        |
| Повышенное содержание минерального азота |                                          |           |               |           |               |           |               |           |
| Дерново-подзолистые                      | <u>21</u>                                | <u>23</u> | <u>18</u>     | <u>19</u> | <u>18</u>     | <u>20</u> | <u>16</u>     | <u>18</u> |
|                                          | 23                                       | 25        | 17            | 19        | 20            | 22        | 18            | 18        |
| Серые лесные                             | <u>13</u>                                | <u>14</u> | <u>12</u>     | <u>14</u> | <u>13</u>     | <u>14</u> | <u>11</u>     | <u>14</u> |
|                                          | 13                                       | 14        | 12            | 13        | 13            | 15        | 12            | 13        |
| Черноземы                                |                                          |           |               |           |               |           |               |           |
| выщелоченные                             | 9                                        | 10        | 9             | 10        | 9             | 10        | 9             | 9         |
| типичные                                 | 10                                       | 11        | 8             | 9         | 9             | 11        | 8             | 8         |
| обыкновенные                             | 6                                        | 7         | 6             | 6         | 6             | 7         | 5             | 6         |
| карбонатные                              | 5                                        | 6         | 5             | 6         | 5             | 6         | 6             | 5         |
| каштановые                               | 5                                        | 6         | 4             | 5         | 5             | 5         | 4             | 4         |

Примечание. Над чертой –  $pH \leq 5.5$ , под чертой –  $pH > 5.5$ .

степенью обеспеченности легкогидролизуемым азотом превышал 30% на дерново-подзолистых и на 21–26% – на серых лесных почвах. При этом разница в долевом участии азота при содержании легкогидролизуемого азота 50 и  $> 100$  мг/кг на супесях составляла двукратную величину, на суглинках в вариантах с низким содержанием подвижных форм фосфора и калия разница увеличилась в 2.5 раза. В то же время, на суглинистых почвах определенное влияние на вклад азотных удобрений в формирование урожайности оказало повышение степени их обеспеченности подвижными формами фосфора и калия. Переход почв от низкой степени в повышенную способствовал приросту вклада при низком содержании легкогидролизуемого азота в зависимости от дозы в

1.3–1.4 раза, при среднем – в 1.6–2.1 раза, при повышенном – в 1.8–2.2 раза (табл. 5, 6).

Наибольшее влияние на прибавку урожая льносоломой от азотных удобрений оказывают величина pH, содержание гумуса и вид предшественника. Аналогичные закономерности прослежены и в отношении участия азотных удобрений в получении урожая (табл. 7). Из агрохимических факторов наибольшее влияние оказывало содержание гумуса в почвах. Сравнение полученных данных показало, что с увеличением гумусированности почв почти в 2 раза снижалась доля участия азотных удобрений в формировании урожайности льносоломой в опытах после зерновых предшественников. В тех случаях, когда лен возделывали после многолетних трав, содержание гумуса не оказало заметного влияния на вклад азотных

**Таблица 2.** Вклад азотных удобрений в формирование урожайности озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах, %

| Содержание в почве, мг/кг                            |                  | pH ≤5.0           |    |    |     | pH >5.0           |    |    |     |
|------------------------------------------------------|------------------|-------------------|----|----|-----|-------------------|----|----|-----|
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                        | K <sub>2</sub> O | Дозы азота, кг/га |    |    |     | Дозы азота, кг/га |    |    |     |
|                                                      |                  | 30                | 60 | 90 | 120 | 30                | 60 | 90 | 120 |
| Содержание минерального азота в почве ≤5 мг/кг       |                  |                   |    |    |     |                   |    |    |     |
| ≤50                                                  | <80              | 42                | 45 | 46 | 43  | 45                | 48 | 48 | 46  |
|                                                      | 81–120           | 40                | 43 | 43 | 41  | 44                | 47 | 47 | 45  |
|                                                      | >120             | 36                | 39 | 39 | 38  | 47                | 42 | 43 | 41  |
| 51–100                                               | <80              | 44                | 45 | 46 | 45  | 49                | 50 | 51 | 50  |
|                                                      | 81–120           | 43                | 46 | 48 | 46  | 45                | 49 | 50 | 49  |
|                                                      | >120             | 39                | 42 | 43 | 42  | 42                | 45 | 46 | 45  |
| >100                                                 | <80              | 38                | 41 | 43 | 44  | 40                | 44 | 46 | 46  |
|                                                      | 81–120           | 38                | 41 | 42 | 43  | 41                | 43 | 47 | 45  |
|                                                      | >120             | 35                | 38 | 40 | 40  | 38                | 40 | 42 | 43  |
| Содержание минерального азота в почве 5.1–10.0 мг/кг |                  |                   |    |    |     |                   |    |    |     |
| ≤50                                                  | <80              | 32                | 35 | 35 | 33  | 34                | 38 | 38 | 36  |
|                                                      | 81–120           | 31                | 34 | 34 | 32  | 34                | 36 | 37 | 35  |
|                                                      | >120             | 28                | 30 | 30 | 29  | 30                | 32 | 33 | 31  |
| 51–100                                               | <80              | 33                | 37 | 38 | 37  | 36                | 39 | 40 | 39  |
|                                                      | 81–120           | 33                | 35 | 36 | 35  | 35                | 38 | 39 | 38  |
|                                                      | >120             | 30                | 32 | 33 | 32  | 32                | 35 | 35 | 34  |
| >120                                                 | <80              | 28                | 31 | 33 | 33  | 31                | 34 | 35 | 36  |
|                                                      | 81–120           | 28                | 31 | 32 | 33  | 31                | 33 | 35 | 35  |
|                                                      | >120             | 26                | 28 | 30 | 30  | 28                | 32 | 32 | 33  |
| Содержание минерального азота в почве >10 мг/кг      |                  |                   |    |    |     |                   |    |    |     |
| ≤50                                                  | <80              | 21                | 23 | 24 | 22  | 23                | 25 | 26 | 26  |
|                                                      | 81–120           | 20                | 22 | 23 | 21  | 22                | 24 | 25 | 23  |
|                                                      | >120             | 18                | 19 | 20 | 19  | 19                | 21 | 22 | 20  |
| 51–100                                               | <80              | 22                | 25 | 25 | 25  | 24                | 27 | 28 | 27  |
|                                                      | 81–120           | 22                | 24 | 24 | 24  | 23                | 26 | 27 | 26  |
|                                                      | >120             | 19                | 21 | 22 | 21  | 21                | 23 | 23 | 23  |
| >100                                                 | <80              | 18                | 20 | 22 | 22  | 20                | 22 | 23 | 24  |
|                                                      | 81–120           | 18                | 20 | 21 | 22  | 20                | 22 | 23 | 23  |
|                                                      | >120             | 17                | 19 | 19 | 20  | 18                | 20 | 21 | 21  |

удобрений в формирование урожайности льна-долгунца.

Величина pH практически не влияла на степень участия азотных удобрений в урожае льно-соломы после обоих предшественников. Дозы азота оказывали незначительное влияние на вклад азотных удобрений в формирование урожайности льна-долгунца, исключая дозу N80, при которой значительно снижалась прибавка урожая от внесения азота.

Сахарная свекла по своим биологическим свойствам относится к культурам, которые предъявляют более высокие требования к уровню почвенного плодородия и минерального питания по сравнению с другими полевыми культурами. Вклад минеральных удобрений в формирование урожайности сахарной свеклы в лесостепной зоне составляет 26–32%, в степной – 16–20% [11]. Основное производство сахарной свеклы сосредоточено в 8-ми регионах Центрального феде-

**Таблица 3.** Вклад азотных удобрений в формирование урожайности яровой пшеницы, %

| Содержание в почве, мг/кг     |                  | Дозы азота, кг/га |    |    |     |     |
|-------------------------------|------------------|-------------------|----|----|-----|-----|
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | 30                | 60 | 90 | 120 | 150 |
| Дерново-подзолистые почвы     |                  |                   |    |    |     |     |
| <50                           | <80              | 21                | 23 | 23 | 22  | 19  |
|                               | 81–120           | 24                | 26 | 26 | 25  | 22  |
|                               | >120             | 24                | 25 | 25 | 24  | 22  |
| 51–100                        | <80              | 20                | 22 | 22 | 22  | 20  |
|                               | 81–120           | 21                | 23 | 23 | 23  | 21  |
|                               | >120             | 21                | 22 | 22 | 22  | 21  |
| >100                          | <80              | 24                | 26 | 27 | 28  | 27  |
|                               | 81–120           | 26                | 27 | 28 | 28  | 28  |
|                               | >120             | 24                | 26 | 27 | 27  | 27  |
| Серые лесные почвы            |                  |                   |    |    |     |     |
| <50                           | <80              | 10                | 11 | 11 | 11  | 9   |
|                               | 81–120           | 12                | 13 | 13 | 12  | 11  |
|                               | >120             | 12                | 13 | 13 | 12  | 11  |
| 51–100                        | <80              | 13                | 14 | 15 | 14  | 13  |
|                               | 81–120           | 14                | 15 | 16 | 15  | 14  |
|                               | >120             | 14                | 15 | 16 | 15  | 14  |
| >100                          | <80              | 13                | 14 | 14 | 15  | 14  |
|                               | 81–120           | 14                | 15 | 16 | 16  | 16  |
|                               | >120             | 14                | 15 | 15 | 16  | 15  |
| Черноземы выщелоченные        |                  |                   |    |    |     |     |
| <50                           | <80              | 8                 | 9  | 9  | 8   | 7   |
|                               | 81–120           | 9                 | 10 | 10 | 10  | 9   |
|                               | >120             | 9                 | 10 | 10 | 10  | 9   |
| 51–100                        | <80              | 10                | 11 | 11 | 11  | 10  |
|                               | 81–120           | 11                | 12 | 12 | 12  | 11  |
|                               | >120             | 11                | 12 | 12 | 12  | 11  |
| >100                          | <80              | 11                | 12 | 12 | 12  | 12  |
|                               | 81–120           | 12                | 13 | 13 | 13  | 13  |
|                               | >120             | 12                | 12 | 13 | 13  | 13  |

рального округа, в 3-х — Южного и Северо-Кавказского, в 7-ми — Приволжского и в одном — Сибирского федерального округа. Эти регионы находятся в зоне распространения черноземных почв, которые, как известно, характеризуются более высоким плодородием по сравнению с другими почвенными разновидностями — дерново-подзолистыми, серыми лесными и каштановыми почвами. Вместе с тем, черноземные почвы, несмотря на то что относятся к одному генетическому типу, заметно различаются по агрохимическим свойствам. В связи с этим, для прогноза эффективности азотных удобрений уместно

**Таблица 4.** Вклад азотных удобрений в формирование урожайности ярового ячменя на дерново-подзолистых почвах, %

| Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> в почве, мг/кг | Дозы азота, кг/га |    |    |     |
|---------------------------------------------------------|-------------------|----|----|-----|
|                                                         | 30                | 60 | 90 | 120 |
| Содержание легкогидролизуемого азота <100 мг/кг         |                   |    |    |     |
| ≤50                                                     | 31                | 34 | 34 | 32  |
| 51–100                                                  | 35                | 38 | 39 | 38  |
| >100                                                    | 24                | 27 | 28 | 28  |
| Содержание легкогидролизуемого азота 101–150 мг/кг      |                   |    |    |     |
| ≤50                                                     | 21                | 24 | 23 | 22  |
| 51–100                                                  | 25                | 28 | 28 | 28  |
| >100                                                    | 17                | 19 | 19 | 20  |
| Содержание легкогидролизуемого азота >150 мг/кг         |                   |    |    |     |
| ≤50                                                     | 7                 | 8  | 8  | 7   |
| 51–100                                                  | 8                 | 10 | 10 | 10  |
| >100                                                    | 5                 | 6  | 6  | 6   |

**Таблица 5.** Вклад азотных удобрений в формирование урожайности картофеля на дерново-подзолистых супесчаных почвах, %

| Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> в почве, мг/кг | Дозы азота, кг/га |    |     |     |
|---------------------------------------------------------|-------------------|----|-----|-----|
|                                                         | 30                | 90 | 120 | 150 |
| Содержание легкогидролизуемого азота ≤50 мг/кг          |                   |    |     |     |
| 51–100                                                  | 28                | 30 | 31  | 32  |
| 101–150                                                 | 30                | 31 | 33  | 33  |
| >150                                                    | 30                | 32 | 32  | 33  |
| Содержание легкогидролизуемого азота 51–100 мг/кг       |                   |    |     |     |
| 51–100                                                  | 19                | 20 | 21  | 21  |
| 101–150                                                 | 19                | 21 | 22  | 22  |
| >150                                                    | 19                | 21 | 21  | 22  |
| Содержание легкогидролизуемого азота >100 мг/кг         |                   |    |     |     |
| 51–100                                                  | 14                | 15 | 16  | 16  |
| 101–150                                                 | 15                | 16 | 17  | 17  |
| >150                                                    | 15                | 16 | 17  | 17  |

использовать иные методы, которые наряду с минеральными формами азота, могут учитывать азот низкомолекулярных органических соединений, которые в течение вегетационного периода могут минерализоваться [12].

К таковым можно отнести методы определения гидролизуемого азота по Тюрину–Кононовой, по Корнфилду и нитрификационной способности почв по Кравкову. В связи с этим, для выявления влияния различных методов определения доступных форм на эффективность приме-



**Таблица 6.** Вклад азотных удобрений в формирование урожайности картофеля на дерново-подзолистых су-глинистых почвах, %

| Содержание, мг/кг                                 |                  | Дозы азота |    |     |     |
|---------------------------------------------------|------------------|------------|----|-----|-----|
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                     | K <sub>2</sub> O | 60         | 90 | 120 | 150 |
| Содержание легкогидролизуемого азота ≤50 мг/кг    |                  |            |    |     |     |
| 51–100                                            | ≤80              | 25         | 27 | 29  | 30  |
|                                                   | 81–120           | 29         | 30 | 31  | 33  |
|                                                   | >120             | 31         | 33 | 34  | 35  |
| 101–150                                           | ≤80              | 30         | 31 | 32  | 34  |
|                                                   | 81–120           | 32         | 33 | 35  | 36  |
|                                                   | >120             | 35         | 36 | 37  | 38  |
| >150                                              | ≤80              | 32         | 34 | 35  | 35  |
|                                                   | 81–120           | 34         | 36 | 37  | 38  |
|                                                   | >120             | 37         | 38 | 39  | 40  |
| Содержание легкогидролизуемого азота 51–100 мг/кг |                  |            |    |     |     |
| 51–100                                            | ≤80              | 12         | 13 | 15  | 17  |
|                                                   | 81–120           | 15         | 16 | 19  | 20  |
|                                                   | >120             | 19         | 20 | 22  | 23  |
| 101–150                                           | ≤80              | 16         | 18 | 19  | 21  |
|                                                   | 81–120           | 19         | 21 | 22  | 23  |
|                                                   | >120             | 22         | 23 | 25  | 26  |
| >150                                              | ≤80              | 19         | 21 | 22  | 24  |
|                                                   | 81–120           | 22         | 23 | 25  | 26  |
|                                                   | >120             | 25         | 26 | 27  | 28  |
| Содержание легкогидролизуемого азота >100 мг/кг   |                  |            |    |     |     |
| 51–100                                            | ≤80              | 3          | 10 | 12  | 14  |
|                                                   | 81–120           | 12         | 14 | 15  | 17  |
|                                                   | >120             | 15         | 17 | 18  | 19  |
| 101–150                                           | ≤80              | 13         | 14 | 16  | 18  |
|                                                   | 81–120           | 16         | 17 | 19  | 20  |
|                                                   | >120             | 19         | 20 | 22  | 23  |
| >150                                              | ≤80              | 16         | 17 | 19  | 20  |
|                                                   | 81–120           | 18         | 20 | 21  | 23  |
|                                                   | >120             | 21         | 22 | 24  | 25  |

нения азотных удобрений под сахарную свеклу агрохимической службой проведена серия полевых опытов. Обобщение результатов этих опытов показало наличие достаточно тесной связи между содержанием азота в почвах, независимо от метода определения, урожайностью сахарной свеклы и прибавкой урожая от азотных удобрений [9], и поэтому данные, показавшие влияние содержания азота в почвах на долевое участие азотных удобрений в формировании урожайности сахарной свеклы, представлены для 4-х методов.

Согласно полученным результатам, вклад азотных удобрений в формирование урожайности

**Таблица 7.** Вклад азотных удобрений в формирование урожайности льна-долгунца на дерново-подзолистых почвах, %

| pH                               | Дозы азота, кг/га |    |    |    |
|----------------------------------|-------------------|----|----|----|
|                                  | 20                | 40 | 60 | 80 |
| Предшественник зерновые культуры |                   |    |    |    |
| Содержание гумуса <1.5%          |                   |    |    |    |
| ≤4.5                             | 21                | 23 | 22 | 17 |
| 4.6–5.0                          | 19                | 21 | 21 | 16 |
| 5.1–5.5                          | 18                | 21 | 20 | 15 |
| 5.6–6.0                          | 18                | 21 | 20 | 15 |
| Содержание гумуса 1.5–2.0%       |                   |    |    |    |
| ≤4.5                             | 16                | 19 | 18 | 12 |
| 4.6–5.0                          | 15                | 17 | 16 | 12 |
| 5.1–5.5                          | 15                | 17 | 16 | 12 |
| 5.6–6.0                          | 15                | 17 | 16 | 12 |
| Содержание гумуса >2.0%          |                   |    |    |    |
| ≤4.5                             | 13                | 14 | 12 | 9  |
| 4.6–5.0                          | 13                | 14 | 12 | 9  |
| 5.1–5.5                          | 13                | 14 | 12 | 9  |
| 5.6–6.0                          | 13                | 14 | 12 | 9  |
| Предшественник многолетние травы |                   |    |    |    |
| ≤4.5                             | 14                | 14 | 13 | 10 |
| 4.6–5.0                          | 14                | 14 | 13 | 10 |
| 5.1–5.5                          | 14                | 14 | 13 | 10 |
| 5.6–6.0                          | 13                | 13 | 12 | 10 |

сти в значительной степени зависел от почвенных разновидностей и содержания доступных форм азота независимо от метода определения. Сравнение показателей черноземов выщелоченных и типичных показало, что содержание легкогидролизуемого азота, определенного методом Корн-филда, в обоих случаях заметно повлияло на степень участия азотных удобрений в урожае (табл. 8). Во всех рассмотренных случаях по мере увеличения запаса доступных форм азота снижалась роль азотных удобрений в продукционном процессе. При низкой степени обеспеченности почв азотом и при одинаковых дозах азотных удобрений их долевое участие отличалось незначительно между изученными объектами, исключая черноземы типичные, где их вклад в некоторых случаях оказался почти в 2 раза меньше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотренные результаты исследования показали, что вклад азотных удобрений в формирование урожайности сельскохозяй-

**Таблица 8.** Вклад азотных удобрений в формирование урожайности сахарной свеклы, %

| Содержание азота в почве, мг/кг                 | Дозы азота, кг/га |    |     |     |     |
|-------------------------------------------------|-------------------|----|-----|-----|-----|
|                                                 | 60                | 90 | 120 | 150 | 180 |
| Центральный федеральный округ                   |                   |    |     |     |     |
| Черноземы выщелоченные (метод Корнфилда)        |                   |    |     |     |     |
| ≤100                                            | 7                 | 13 | 15  | 17  | 17  |
| 101–150                                         | 5                 | 11 | 13  | 14  | 15  |
| 151–200                                         | 4                 | 9  | 11  | 12  | 13  |
| >200                                            | 4                 | 8  | 10  | 11  | 12  |
| Черноземы типичные (метод Корнфилда)            |                   |    |     |     |     |
| ≤100                                            | 8                 | 9  | 9   | 10  | 10  |
| 101–150                                         | 6                 | 7  | 8   | 8   | 8   |
| 151–200                                         | 5                 | 6  | 7   | 7   | 7   |
| >200                                            | 5                 | 6  | 6   | 6   | 7   |
| Черноземы обыкновенные (метод Тюрина–Кононовой) |                   |    |     |     |     |
| ≤40                                             | 13                | 16 | 17  | 18  | 18  |
| 41–50                                           | 10                | 13 | 14  | 15  | 15  |
| 51–70                                           | 5                 | 8  | 9   | 9   | 10  |
| Южный федеральный округ                         |                   |    |     |     |     |
| Черноземы карбонатные (метод Кравкова)          |                   |    |     |     |     |
| ≤5.0                                            | —                 | 15 | 20  | —   | —   |
| 5.1–8.0                                         | —                 | 11 | 14  | —   | —   |
| 8.1–15.0                                        | —                 | 9  | 13  | —   | —   |
| >15.0                                           | —                 | 1  | 1   | —   | —   |
| Сибирский федеральный округ                     |                   |    |     |     |     |
| Черноземы выщелоченные (нитратный азот)         |                   |    |     |     |     |
| ≤5.0                                            | 5                 | 16 | 21  | —   | —   |
| 5.1–8.0                                         | 3                 | 9  | 13  | —   | —   |
| >15.0                                           | 2                 | 6  | 8   | —   | —   |

зяйственных культур варьирует в широких пределах и зависит от их биологических особенностей и агрохимических свойств почв, из которых наибольшее влияние оказывает степень обеспеченности почв доступными формами азота. Наибольшее долевое участие азотных удобрений в урожайности озимой пшеницы проявилось при содержании минерального азота <5 мг/кг и составляло в зависимости от дозы 35–48%, тогда как при содержании >10 кг/кг — 17–26%. Подобная закономерность отмечена для ярового ячменя, в опытах с которым содержание азота в почве определяли методом Корнфилда. При степени обеспеченности доступными формами азота дерново-подзолистых почв <100 мг/кг вклад азотных

удобрений в урожай составил 24–34%, при содержании >150 мг/кг — 5–10%.

В опытах с картофелем долевое участие азотных удобрений в формировании урожайности было аналогично их влиянию на зерновые культуры, но при этом на супесчаных почвах при увеличении содержания легкогидролизуемого азота снижение роли азотных удобрений в продукционном процессе происходило быстрее по сравнению с суглинистыми почвами.

На вклад азотных удобрений в формировании урожайности льна-долгунца большое влияние оказало содержание гумуса в почвах. По мере увеличения гумусированности дерново-подзолистых почв снижалось долевое участие азотных удобрений в урожае льносоломы. При содержании гумуса <1.5% величина вклада составляла 15–23%, при >2.0% — 9–14%.

Степень участия азотных удобрений в формировании урожайности сахарной свеклы оказалась менее выраженной по сравнению с рассмотренными культурами, но при этом прослежена аналогичная закономерность — снижение доли азотных удобрений в создании урожая при увеличении содержания доступных форм азота в почвах.

На величину долевого участия азотных удобрений в формировании урожайности сельскохозяйственных культур кроме содержания доступных форм азота в почве заметное влияние оказывали и другие агрохимические свойства почв. На урожайность пшеницы заметное положительное влияние оказало снижение кислотности и улучшение степени обеспеченности почв подвижными формами фосфора и калия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богдевич И.М., Василюк Г.В., Грузд В.К. Методика определения эффективности удобрений в Белорусской республике // Повышение экономической эффективности применения минеральных удобрений. М.: ЦИНАО, 1991. С. 54–68.
2. Инструкция и нормативы по определению экономической и энергетической эффективности применения удобрений. М.: Госагропром СССР, 1987. 44 с.
3. Нормативы для определения потребности сельского хозяйства в минеральных удобрениях. М.: МСХ СССР, 1985. 336 с.
4. Токарев В.В. Методика определения эффективности минеральных удобрений в условиях сельскохозяйственного производства и ее совершенствование // Повышение экономической эффективности применения минеральных удобрений. М.: ЦИНАО, 1991. С. 3–14.
5. Ткач Н.М. Определение эффективности удобрений с учетом поправочного коэффициента на ка-

- чество почвы в республике Молдовы // Там же. С. 85–94.
6. Региональные нормативы окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур. М.: ВНИИА, 2016. 96 с.
  7. Прогнозная оценка окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая картофеля в зависимости от агрохимических свойств почв. М.: ВНИИА, 2014. 80 с.
  8. Система оценки влияния агрохимических факторов на формирование урожайности льна-долгунца. М.: ВНИИА, 2016. 124 с.
  9. Нормативы оценки и методика прогнозирования эффективности применения минеральных удобрений под сахарную свеклу. М.: ВНИИА, 2018. 188 с.
  10. Шафран С.А. Баланс азота в земледелии России и его регулирование в современных условиях // Агрохимия. 2020. № 6. с. 14–21.
  11. Державин Л.М. Применение минеральных удобрений в интенсивном земледелии. М.: Колос, 1992. 272 с.
  12. Никитин В.В. Методические основы диагностики азотного режима чернозема типичного в зерносвекловичном севообороте // Агрохимия. 2013. № 2. С. 15–21.

## Contribution of Mineral Fertilizers to the Formation of the Yield of Field Crops. Message 1. Nitrogen Fertilizers

S. A. Shafran

*D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry  
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia  
E-mail: shafran38@mail.ru*

The results of a study on the influence of agrochemical properties of soils on the contribution of nitrogen fertilizers to the formation of the yield of the main agricultural crops cultivated in our country are considered. It is shown that the share of nitrogen fertilizers in the crop varies widely and depends on the biological characteristics of crops and agrochemical properties of soils, among which the degree of availability of available forms of nitrogen had the greatest influence. Regardless of the method of determination, as the nitrogen content in the soil increased, the contribution of nitrogen fertilizers to yield formation sharply decreased. During the transition of soils from the category of low availability of available nitrogen to an increased one, the contribution of nitrogen fertilizers in the formation of yields of winter and spring wheat, spring barley on sod-podzolic soils and potatoes on sandy loam soils decreased by 2.0 or more times, potatoes on loam – by 1.5 times. The role of nitrogen fertilizers in the formation of the yield of long-legged flax decreased as the humus content of the soil increased. With a humus content of <1.5%, the share of the effect of nitrogen fertilizers on the crop was 15–23%, at 1.5–2.0% – 12–19%, at >2.0% – 14%. The degree of participation of fertilizers in the formation of sugar beet varied from 6 to 18%.

*Key words:* contribution of fertilizers, nitrogen fertilizers, agrochemical properties of soil, mineral nitrogen, available forms of nitrogen.

УДК 631.82:631.43:631.559:633.11“321”:631.421.1

# ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ И ОКУПАЕМОСТЬ УДОБРЕНИЙ В ДЛИТЕЛЬНОМ СТАЦИОНАРНОМ ОПЫТЕ

© 2021 г. А. Г. Дзюин

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН  
427007 Ижевск, Завьяловский р-н, с. Первомайский, ул. Ленина, 1, Удмуртская Республика, Россия

E-mail: ugnish@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.12.2020 г.

После доработки 24.02.2021 г.

Принята к публикации 10.04.2021 г.

Площади посевов яровой пшеницы в Удмуртской Республике, как и в Северо-Восточной зоне Нечерноземной России, в которую она входит своей территорией, за последние годы имеют тенденцию расширения. За 15 лет в республике они увеличились на 30 тыс. га. Однако, вследствие низкого плодородия почв, участвовавших летних засух, недостаточного применения удобрений, урожайность пшеницы остается низкой ( $\approx 14$  ц/га в среднем за последние 10–12 лет). Повышение ее урожайности возможно путем регулирования системы применения удобрений. В этой связи целью работы было выявление рациональных доз и системы применения удобрения под яровую пшеницу на основе анализа результатов исследований, проведенных в многолетнем стационарном опыте. Опыт заложен в 1971–1972 гг. на дерново-среднеподзолистой среднесуглинистой почве в 2-х закладках с показателями:  $pH_{KCl}$  5.0,  $H_r$  – 2.7,  $S$  – 14.8 мг-экв/100 г,  $P_2O_5$  – 52.0,  $K_2O$  – 92 мг/кг почвы, гумус – 2.5%. Прошло 6 ротаций 8-польного севооборота с чередованием культур: пар черный–озимая рожь–картофель в 1–3-й ротациях–кукуруза в 4–5-й ротациях–яровая пшеница + клевер, клевер 1-го года пользования (г.п.)–клевер 2-го г.п.–озимая рожь–ячмень. Схема опыта: фактор А – фон (0 – нулевой, Изв<sup>2</sup> – известь по 1  $H_r$  в 1-й + по 2  $H_r$  во 2-й ротациях, Нав<sup>5</sup>Сид – навоз 40 т/га в 1-й + + по 60 т/га во 2–5-1 ротациях + сидерат в 6-й ротации, Изв<sup>2</sup>Нав<sup>5</sup>Сид – в соответствующих сочетаниях. Фактор В – минеральные удобрения. Повторность опыта четырехкратная. Метеоусловия – по данным ЦГМ “Ижевск”. В благоприятные по метеоусловиям годы урожайность яровой пшеницы на удобренных почвах достигала 36–41 ц/га, при недостатке осадков – снижалась до 18 ц/га и более, наибольшая – формировалась на известково-унавоженном фоне, далее на унавоженном и меньше на известкованном и нулевом фонах при внесении полного (NPK) удобрения с некоторым снижением в ряду NP, NK и PK-удобрения. В системе удобрения оптимальными дозами для пшеницы были: на нулевом фоне – N50P50K50, на фоне извести – N40P40K40, на фоне навоза – N30P30K30, на фоне известь + навоз – N10P10K10. На фонах навоз и особенно известь + навоз эффективность N60P60K60 повышалась. Хозяйствам, в зависимости от условий их развития, для получения зерна яровой пшеницы 20–30 ц/га на соответствующих для этого фонах рекомендовано вносить минеральные удобрения NPK в дозах от 10 до 60 кг д.в./га, которые могут обеспечить уровень их окупаемости в пределах с 21 до 5 на фоне известь + навоз, с 13 до 4 – на фоне навоз и с 16 до 3 кг/кг на нулевом и известкованном фонах соответственно дозам.

**Ключевые слова:** севооборот, яровая пшеница, урожайность, метеорологические условия, дозы удобрений, известь, навоз, окупаемость удобрений.

DOI: 10.31857/S0002188121070048

## ВВЕДЕНИЕ

Получение дешевой продукции растениеводства – одна из основных задач в отрасли сельского хозяйства. Природные условия Удмуртской Республики, как и всей Северо-Восточной зоны Нечерноземья и Среднего Предуралья не благоприятствуют получению высоких урожаев без значительных вложений. Низкое плодородие

дерново-подзолистых почв, длительная холодная зима, короткое лето с неравномерным выпадением осадков, засушливыми периодами являются основными факторами, препятствующими повышению эффективности сельскохозяйственного производства. Несмотря на это, известкование и фосфоритование почв, применение органических и минеральных удобрений позволяют суще-

ственно повысить урожайность выращиваемых зерновых культур, в том числе яровой пшеницы [1–3]. В этой связи уместно привести высказывание В.И. Кирюшина о том, что со стороны наиболее консервативной части общества имеются попытки отказаться от применения минеральных удобрений и пестицидов, что многие задачи оптимизации земледелия и предотвращения деградации почв трудно решить без их применения [4].

Яровая пшеница в Удмуртской Республике является не главной зерновой культурой, однако ее посевные площади в 1990-е гг. стали расширяться, достигнув в 2000 г. 105 тыс. га (за 15 лет увеличились на 30 тыс. га). В структуре посевных площадей оптимальный размер площади ее посева в перспективе составляет 120 тыс. га, как наиболее ценной культуры продовольственного назначения [5]. Почвенно-климатические условия в республике — явно неблагоприятные для яровой пшеницы. Получение высокой урожайности с хорошим качеством продовольственного зерна возможно на окультуренных почвах, с использованием оптимальной системы удобрения. Для ее выращивания лучше подходит южная половина республики. В современных условиях наиболее целесообразным является комплексный подход к решению вопросов как воспроизводства плодородия почв, так и увеличения урожайности отдельных сельскохозяйственных культур. Сочетание минеральных, органических удобрений и известкования — один из основных факторов повышения плодородия почв, улучшения агрохимического их состояния [6]. Учитывая отсутствие достаточных финансовых и материальных средств, к разработке систем удобрения следует подходить с позиции ресурсосбережения. Цель работы — на основе анализа результатов исследования, проведенного в многолетнем стационарном опыте, выявить рациональные дозы и систему применения удобрений под яровую пшеницу.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в длительном стационарном опыте, заложенном в 1971–1972 гг. с двукратным повторением во времени, который включен в реестр Географической сети опытов с удобрениями и другими агрохимическими средствами ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова. Название опыта — “Влияние систем удобрения на плодородие почвы и продуктивность восьмипольного севооборота при длительном их применении”. Выдан аттестат длительного опыта под № 051 за подписью Президента РАСХН академика Г.А. Романенко и директора ВИУА Н.З. Милащенко.

Севооборот — 8-польный с чередованием культур: 1 — пар черный, 2 — озимая рожь, 3 — картофель в 1–3-й и кукуруза в 4–5-й ротациях, 4 — яровая пшеница + клевер, 5 — клевер 1-го г.п., 6 — клевер 2-го г.п., 7 — озимая рожь, 8 — ячмень. С момента закладки прошло 6 ротаций. Схема опыта состоит из 2-х факторов. Фактор *A* — фон: 0 — нулевой, Изв<sup>2</sup> — известь по 1  $H_r$  в начале 1-й ротации севооборота + известь по 2  $H_r$  в начале 2-й ротации, Нав<sup>5</sup>Сид — навоз 40 т/га внесли в 1-й ротации севооборота + по 60 т/га во 2–5-ю ротации + сидерат в 6-й ротации; Изв<sup>2</sup>Нав<sup>5</sup>Сид — известь по 1  $H_r$  в 1-й и по 2  $H_r$  во 2-ю ротации + навоз 40 т/га в 1-й и по 60 т/га во 2–5-ю ротации + сидерат в 6-й ротации. Фактор *B* — варианты с минеральными удобрениями. Фосфорные и калийные удобрения вносили осенью под зяблевую обработку, азотные удобрения — до посева под предпосевную культивацию. В 3–6-й ротациях дважды за ротацию севооборота запахивали солому озимой ржи. В 6-й ротации вместо навоза в пару заделали сидерат — горохоовсяную смесь с массой 18 т/га. Дополнительно к фону изменяли в вариантах дозы минеральных удобрений в ротациях севооборота с целью повышения плодородия почвы, выявления действия разных сочетаний удобрений на почву и урожайность культур, а также в связи с переходом на адаптивно-ландшафтную систему земледелия, в которой основным направлением для изучения и внедрения стали биологизация земледелия с одновременным снижением уровня применения минеральных удобрений. Все изменения согласованы с комиссией по вопросам методики исследований ВИУА–ВНИИА.

Почва — дерново-среднеподзолистая среднесуглинистая с агрохимическими показателями до закладки опыта:  $pH_{KCl}$  5.0,  $H_r$  по Каппену — 2.7 мг-экв/100 г,  $S$  (сумма поглощенных оснований) по Каппену–Гильковицу — 14.8 мг-экв/100 г,  $P_2O_5$  (по Кирсанову) — 52.0,  $K_2O$  (по Кирсанову) — 92 мг/кг почвы, гумус по Тюрину — 2.5%. Сорта яровой пшеницы, высеваемые в опыте в ротациях: в 1-й — Отечественная, во 2-й — Московская 35, в 3-й — Энита, в 4-й — Иргина, в 5-й — Ирень, в 6-й — Свеча. Повторность опыта четырехкратная. Статистическую обработку данных урожайности провели методом дисперсионного анализа данных многофакторного полевого опыта (метод рендомизированных повторений–блоков) по [7]. Статистическую обработку средней урожайности 2-х закладок опыта (табл. 2) провели этим же методом с данными 8-ми повторений (по 4 повторения в каждой закладке). Наблюдения метеоусло-

**Таблица 1.** Урожайность яровой пшеницы в севообороте стационарного опыта в закладках, ц/га

| Ротация | Год  | Вариант     | Нулевой фон |      | Известь по 1 + 2 $H_T$ |       | Навоз 40 +<br>+ по 60 т/га |      | Известь по 1 + 2 $H_T$ +<br>+ навоз 40 + по 60 т/га |      |
|---------|------|-------------|-------------|------|------------------------|-------|----------------------------|------|-----------------------------------------------------|------|
|         |      |             | 1           | 2    | 1                      | 2     | 1                          | 2    | 1                                                   | 2    |
| 1-я     | 1974 | 0           | —           | —    | 21.5                   | —     | 21.4                       | —    | 21.3                                                | —    |
|         |      | N90P60      | —           | —    | 28.6                   | 7.1   | 26.0                       | 4.6  | 28.5                                                | 7.2  |
|         |      | N90K60      | —           | —    | 25.8                   | 4.3   | 23.9                       | 2.5  | 26.2                                                | 4.9  |
|         |      | P60K60      | —           | —    | 20.6                   | — 0.9 | 24.2                       | 2.8  | 22.3                                                | 1.0  |
|         |      | N90P60K60   | —           | —    | 29.3                   | 7.8   | 27.8                       | 6.4  | 28.2                                                | 6.9  |
|         |      | $HCP_{05}$  | —           | —    | —                      | 3.0   | —                          | 3.0  | —                                                   | 3.0  |
| 2-я     | 1983 | 0           | 28.7        | —    | 26.6                   | —     | 31.5                       | —    | 30.3                                                | —    |
|         |      | N120P90     | 29.6        | 0.9  | 26.6                   | 0     | 30.8                       | —0.7 | 28.2                                                | —2.1 |
|         |      | N120K90     | 30.5        | 1.8  | 27.7                   | 1.1   | 30.7                       | —0.8 | 28.9                                                | —1.4 |
|         |      | P90K90      | 32.9        | 4.2  | 31.6                   | 5.0   | 35.4                       | 3.9  | 32.5                                                | 2.2  |
|         |      | N120P90K90  | 31.4        | 2.7  | 29.0                   | 2.4   | 31.8                       | 0.3  | 28.7                                                | —1.6 |
|         |      | $HCP_{05}$  | —           | 3.4  | —                      | 3.4   | —                          | 3.4  | —                                                   | 3.4  |
| 3-я     | 1990 | 0           | 25.5        | —    | 27.4                   | —     | 29.6                       | —    | 29.4                                                | —    |
|         |      | N90P60      | 33.7        | 8.2  | 36.6                   | 9.2   | 36.6                       | 7.0  | 38.4                                                | 9.0  |
|         |      | N90K60      | 31.0        | 5.5  | 33.0                   | 5.6   | 34.6                       | 5.0  | 34.9                                                | 5.5  |
|         |      | P90K60      | 27.9        | 2.4  | 31.4                   | 4.0   | 31.7                       | 2.1  | 33.1                                                | 3.7  |
|         |      | N90P60K60   | 36.3        | 10.8 | 37.0                   | 9.6   | 39.1                       | 9.5  | 41.8                                                | 12.4 |
|         |      | $HCP_{05}$  | —           | 3.5  | —                      | 3.5   | —                          | 3.5  | —                                                   | 3.5  |
|         | 1991 | 0           | 18.8        | —    | 20.1                   | —     | 20.9                       | —    | 22.3                                                | —    |
|         |      | N90P60      | 22.0        | 3.2  | 24.9                   | 4.8   | 25.5                       | 4.6  | 28.8                                                | 6.5  |
|         |      | N90K60      | 21.1        | 2.3  | 22.4                   | 2.3   | 23.5                       | 2.6  | 25.8                                                | 3.5  |
|         |      | P90K60      | 21.4        | 2.6  | 22.6                   | 2.5   | 23.9                       | 3.0  | 25.7                                                | 3.4  |
|         |      | N90P60K60   | 28.1        | 9.3  | 29.8                   | 9.7   | 30.8                       | 9.9  | 31.0                                                | 8.7  |
|         |      | $HCP_{05}$  | —           | 2.2  | —                      | 2.2   | —                          | 2.2  | —                                                   | 2.2  |
| 4-я     | 1998 | 0           | 8.8         | —    | 9.4                    | —     | 13.5                       | —    | 13.8                                                | —    |
|         |      | N60P120     | 10.6        | 1.8  | 11.3                   | 1.9   | 15.8                       | 2.3  | 16.3                                                | 2.5  |
|         |      | N60K120     | 10.5        | 1.2  | 10.2                   | 0.8   | 15.0                       | 1.5  | 16.9                                                | 3.1  |
|         |      | P120K120    | 10.6        | 1.8  | 11.7                   | 2.3   | 16.8                       | 3.3  | 17.0                                                | 3.2  |
|         |      | N60P120K120 | 12.2        | 3.4  | 12.8                   | 3.4   | 18.4                       | 4.9  | 21.2                                                | 7.4  |
|         |      | $HCP_{05}$  | —           | 2.2  | —                      | 2.2   | —                          | 2.2  | —                                                   | 2.2  |
|         | 1999 | 0           | 12.2        | —    | 9.4                    | —     | 18.8                       | —    | 16.3                                                | —    |
|         |      | N60P120     | 16.9        | 4.7  | 14.3                   | 4.9   | 20.0                       | 1.2  | 19.0                                                | 2.7  |
|         |      | N60K120     | 17.7        | 5.5  | 16.6                   | 7.2   | 20.1                       | 1.3  | 17.4                                                | 1.1  |
|         |      | P120K120    | 13.4        | 1.2  | 11.2                   | 1.8   | 19.4                       | 0.6  | 14.4                                                | —1.9 |
|         |      | N60P120K120 | 20.3        | 8.1  | 13.6                   | 4.2   | 21.6                       | 2.8  | 19.3                                                | 3.0  |
|         |      | $HCP_{05}$  | —           | 2.2  | —                      | 2.2   | —                          | 2.2  | —                                                   | 2.2  |

Таблица 1. Окончание

| Ротация | Год  | Вариант    | Нулевой фон |     | Известь по 1 + 2 $H_T$ |      | Навоз 40 +<br>+ по 60 т/га |      | Известь по 1 + 2 $H_T$ +<br>+ навоз 40 + по 60 т/га |      |
|---------|------|------------|-------------|-----|------------------------|------|----------------------------|------|-----------------------------------------------------|------|
|         |      |            | 1           | 2   | 1                      | 2    | 1                          | 2    | 1                                                   | 2    |
| 5-я     | 2006 | 0          | 18.3        | —   | 20.7                   | —    | 26.9                       | —    | 23.8                                                | —    |
|         |      | N40        | 22.6        | 4.3 | 28.9                   | 8.2  | 38.0                       | 11.1 | 32.9                                                | 9.1  |
|         |      | K40        | 27.0        | 8.7 | 19.2                   | —1.5 | 27.5                       | 0.6  | 30.2                                                | 6.4  |
|         |      | P40        | 22.1        | 3.8 | 17.8                   | —2.9 | 30.5                       | 3.6  | 31.3                                                | 7.5  |
|         |      | N40P40K40  | 23.2        | 4.9 | 22.8                   | 2.1  | 34.6                       | 7.7  | 35.2                                                | 11.4 |
|         |      | $HCP_{05}$ | —           | 4.4 | —                      | 4.4  | —                          | 4.4  | —                                                   | 4.4  |
|         | 2007 | 0          | 14.2        | —   | 10.2                   | —    | 14.4                       | —    | 14.0                                                | —    |
|         |      | N40        | 19.1        | 4.9 | 20.1                   | 9.9  | 17.3                       | 2.9  | 18.2                                                | 4.2  |
|         |      | K40        | 17.5        | 3.3 | 16.4                   | 6.2  | 20.1                       | 5.7  | 18.1                                                | 4.1  |
|         |      | P40        | 14.7        | 0.5 | 13.6                   | 3.4  | 15.3                       | 0.9  | 18.2                                                | 4.2  |
|         |      | N40P40K40  | 18.8        | 4.6 | 19.5                   | 9.3  | 22.5                       | 8.1  | 26.4                                                | 12.4 |
|         |      | $HCP_{05}$ | —           | 1.1 | —                      | 1.1  | —                          | 1.1  | —                                                   | 1.1  |
|         | 2013 | 0          | 6.7         | —   | 6.6                    | —    | 8.7                        | —    | 8.3                                                 | —    |
|         |      | N40P40     | 7.7         | 1.0 | 8.2                    | 1.6  | 10.0                       | 1.3  | 9.4                                                 | 1.1  |
|         |      | N40K40     | 8.3         | 1.6 | 7.7                    | 1.1  | 9.2                        | 0.5  | 8.6                                                 | 0.3  |
|         |      | P40K40     | 7.9         | 1.2 | 6.9                    | 0.3  | 12.2                       | 3.5  | 9.0                                                 | 0.7  |
|         |      | N10P10K10  | 8.2         | 1.5 | 8.6                    | 2.0  | 12.4                       | 3.7  | 10.8                                                | 2.5  |
|         |      | N20P20K20  | 8.8         | 2.1 | 8.7                    | 2.1  | 11.5                       | 2.8  | 9.7                                                 | 1.4  |
|         |      | N30P30K30  | 8.9         | 2.2 | 8.5                    | 1.9  | 13.4                       | 4.7  | 11.5                                                | 3.2  |
|         |      | N40P40K40  | 8.8         | 2.1 | 9.0                    | 2.4  | 11.8                       | 3.1  | 10.9                                                | 2.6  |
|         |      | N50P50K50  | 9.6         | 2.9 | 9.4                    | 2.8  | 10.5                       | 1.8  | 11.1                                                | 2.8  |
|         |      | N60P60K60  | 9.2         | 2.5 | 9.7                    | 3.1  | 13.4                       | 4.7  | 11.9                                                | 3.6  |
|         |      | $HCP_{05}$ | —           | 1.2 | —                      | 1.2  | —                          | 1.2  | —                                                   | 1.2  |
|         | 2014 | 0          | 20.9        | —   | 23.4                   | —    | 26.4                       | —    | 23.4                                                | —    |
|         |      | N40P40     | 28.4        | 7.5 | 25.9                   | 2.5  | 29.6                       | 3.2  | 29.8                                                | 6.4  |
|         |      | N40K40     | 27.1        | 6.2 | 27.2                   | 3.8  | 30.3                       | 3.9  | 26.8                                                | 3.4  |
|         |      | P40K40     | 23.2        | 2.3 | 26.6                   | 3.2  | 27.2                       | 0.8  | 24.4                                                | 1.0  |
|         |      | N10P10K10  | 29.2        | 8.3 | 28.0                   | 4.6  | 30.7                       | 4.3  | 33.4                                                | 10.0 |
|         |      | N20P20K20  | 27.6        | 6.7 | 25.7                   | 2.3  | 30.1                       | 3.7  | 32.3                                                | 8.9  |
|         |      | N30P30K30  | 28.8        | 7.9 | 27.2                   | 3.8  | 31.5                       | 5.1  | 32.6                                                | 9.2  |
|         |      | N40P40K40  | 29.3        | 8.4 | 27.7                   | 4.3  | 32.7                       | 6.3  | 33.3                                                | 9.9  |
|         |      | N50P50K50  | 29.3        | 8.4 | 27.0                   | 3.6  | 32.6                       | 6.2  | 34.4                                                | 11.0 |
|         |      | N60P60K60  | 29.4        | 8.5 | 26.7                   | 3.3  | 35.7                       | 9.3  | 38.3                                                | 14.9 |
|         |      | $HCP_{05}$ | —           | 2.0 | —                      | 2.0  | —                          | 2.0  | —                                                   | 2.0  |

Примечание. В графе 1 — урожайность, 2 — прибавка урожайности, ц/га.

вий вели на агрометеорологической станции “Ижевск” на смежных полях стационарного опыта.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия в период вегетации растений яровой пшеницы чаще всего складывались неблагоприятные из-за недостатка выпавших осадков. Относительно благоприятными для формирования ее урожая были погодные условия 1974 г. (1-я закладка 1-й ротации севооборота). Во 2-й закладке в 1975 г. вследствие засухи урожай сильно пострадал. Таким же засушливым был 1982 г. во 2-й ротации, 1983 г. выдался более благоприятным. В 3-й ротации 1990 г. оказался благоприятным, в 1991 г. осадков выпало: в июне — 38.2%, в июле — 80% нормы. В 4-й ротации севооборота погодные условия в оба года выращивания пшеницы были неблагоприятными: в 1998 г. за период всей вегетации растениям не хватало влаги (в мае осадков выпало 70.5, в июне — 90, июле — 58.9% нормы, в 1999 г. в июне — 35.8%). В 2006 г. (5-я ротация) июнь был также засушливым, осадков выпало всего 35% нормы, но 2007 г. выдался влажным: в мае, июне и июле осадков выпало 149, 129 и 192% соответственно. В 6-й ротации тоже повторялись засушливые периоды. В 2013 г. уже в мае наметился недостаток осадков (83.5%), в июне выпало всего 36.2% нормы. В 2014 г. засушливым оказался май (40.8% осадков).

Неблагоприятные погодные условия отрицательно влияли на урожайность яровой пшеницы. Практически в каждой ротации севооборота она попадала в засуху. В жестких условиях засухи формировалась очень низкая урожайность яровой пшеницы: в 1975 г. — 4.5–8.7, 1982 г. — 5.4–9.8 ц/га, поэтому показатели этих лет не рассматривали. В 1974 г. урожайность составила 20.6–29.3 ц/га (табл. 1). Влияние фонов в варианте без минеральных удобрений на величине урожайности не проявилось (21.3–21.5 ц/га). Следовательно, последнее действие навоза закончилось еще на 2-й культуре — картофеле. Не отмечено действие и извести в сочетании с навозом. Внесение минеральных удобрений привело к повышению урожайности пшеницы. Наибольшие прибавки, с преимуществом на известкованных фонах, получены в варианте с внесением полного минерального удобрения — 6.4–7.8, а также в варианте NP — 4.6–7.2 ц/га. Поменьше были прибавки в варианте NK на известкованных фонах — 4.3–4.9 ц/га. Не привело к повышению урожайности применение фосфорно-калийных удобрений.

Во 2-й ротации севооборота в благоприятном 1983 г. урожайность яровой пшеницы в контроль-

ных вариантах без внесения минеральных удобрений составила: в 1983 г. — 26.6–31.5, что было больше на 5.1–10.1 ц/га по сравнению с 1974 г., причем более высокие прибавки были на фонах с внесением навоза под 1-ю и 2-ю ротации. Действие минеральных удобрений проявилось только в варианте РК — с фосфорно-калийными удобрениями.

В 1990 г. (1-я закладка 3-й ротации) для яровой пшеницы выдались благоприятные погодные условия. Показатели урожайности по фонам в контрольном варианте практически были сравнимы с данными 1983 г., тогда как в вариантах с минеральными удобрениями они были более схожими с данными 1974 г. Наиболее высокая урожайность пшеницы была получена на унавоженных фонах с внесением полного минерального удобрения N90P60K60 (39.1–41.8 ц/га), и несколько меньше на нулевом и известкованном фонах (36.3–37.0 ц/га). Соответственно были высокими прибавки от минеральных удобрений: 9.5–12.4 и 9.6–10.8 ц/га. На втором месте по величине урожайности и прибавок был вариант NP с показателями 33.7–38.4 и 7.0–9.2 ц/га соответственно.

Во все последующие годы выращивания пшеницы в опыте создавались менее благоприятные погодные условия. В 1991 г. из-за недостатка влаги урожайность в контрольном варианте снизилась до 18.8–22.3 ц/га, а наибольшая сформировалась в варианте N90P60K60: на нулевом и известкованном фонах — 28.1–29.8, на унавоженных фонах — 30.8–31.0 ц/га. Прибавки составили 9.3–9.7 и 8.7–9.9 ц/га соответственно. Все парные варианты обеспечили получение достоверных прибавок урожая, но наибольшими прибавками выделился вариант NP.

Яровая пшеница в 4-й ротации на обеих закладках испытывала дефицит влаги, в результате чего урожайность сильно пострадала. В варианте без удобрений величина ее в зависимости от фонов изменялась: в 1998 г. — в пределах 8.8–13.8, в 1999 г. — 9.4–18.8 ц/га. Более высокая урожайность (21.2 и 21.6 ц/га) и соответственно прибавки отмечены в вариантах с внесением всех 3-х элементов питания. При этом наибольшая прибавка получена в 1998 г. на известково-унавоженном фоне (7.4 ц/га), в 1999 г. — на нулевом фоне (8.1 ц/га). Достоверными были прибавки и в парных вариантах: в первой закладке в варианте NP на унавоженных фонах, в варианте NK — на известково-унавоженном фоне, в варианте РК — на известкованном и унавоженных фонах. Во 2-й закладке в вариантах NP, NK на нулевом, известкованном и NP — известково-унавоженном фонах.



В 5-й ротации парные варианты были преобразованы в однокомпонентные с целью выявления действия элемента питания в чистом виде (без сочетания с другими элементами) в насыщенном удобрениями длительном севообороте. Так сложилось, что наибольшая урожайность в 2006 г. была не в трехкомпонентном варианте, как в предыдущих ротациях, а в одном из однокомпонентных вариантов. На нулевом фоне наибольшие урожайность и ее прибавка оказались в варианте К40 (27.0 и 8.7 ц/га соответственно), на известкованном фоне — в варианте N40 (28.9 и 8.2 ц/га), на фоне навоза — также в варианте N40 (38.0 и 11.1 ц/га), и лишь на фоне извести + навоза — в варианте с полным удобрением N40P40K40 (35.2 и 11.4 ц/га). В условиях необычно влажного 2007 г. эффективность удобрений в связи с вымыванием азота и отчасти калия заметно снизилась. На нулевом и известкованном фонах наилучшее действие оказало внесение азотных и азотно-фосфорно-калийных удобрений, на фонах навоза и извести + навоза — полное удобрение и внесение калийного удобрения.

Недостаточное количество выпавших осадков в июне 2013 г. (6-я ротация) резко снизило урожайность яровой пшеницы — до 6.6–8.7 ц/га в вариантах без минеральных удобрений. Эффективность минеральных удобрений в этих условиях зависела от последствия фоновых удобрений. На нулевом фоне (без извести и навоза) с повышением доз удобрений урожайность пшеницы увеличивалась до уровня применения доз N40P40K40–N50P50K50, на известкованном фоне — до уровня доз N40P40K40–N60P60K60, на унавоженных фонах — до уровня доз от N30P30K30 до N60P60K60. В условиях лучшей обеспеченности влагой в 2014 г. в варианте без минеральных удобрений урожайность в зависимости от фона изменялась в пределах 20.9–26.4 ц/га (наибольшая была на фоне навоза). На нулевом и известкованном фонах, чтобы получить наибольшую урожайность, достаточным оказалось внесение удобрений в дозе N10P10K10 (29.2 и 28.0 ц/га), на фоне навоза и на фоне навоза + извести — в дозе N60P60K60 (35.7 и 38.3 ц/га).

Приведенные данные свидетельствовали о значительном влиянии погодных условий на урожайность яровой пшеницы. При недостаточном количестве выпавших осадков эффективность минеральных удобрений резко снижалась. В этой связи определенный интерес представляет рассмотрение усредненных данных 2-х закладок опыта (табл. 2).

В 1-й и во 2-й ротациях севооборота средняя урожайность пшеницы 2-х закладок опыта изме-

нялась в зависимости от фона и варианта так же, как в более благоприятные 1974 и 1983 гг. В 3-й ротации наибольшая урожайность формировалась на известково-унавоженном фоне в варианте с внесением полного минерального удобрения N90P60K60 — 36.4 ц/га. За ним следовали унавоженный, известкованный и нулевой фоны. На всех фонах более высокая эффективность минеральных удобрений была при совместном внесении NPK, несколько меньше — со снижением в ряду парных вариантов NP, NK и PK-удобрений. Высокая роль азота в повышении урожайности яровой пшеницы выявлена и на дерново-слабоподзолистой среднесуглинистой почве в Республике Марий Эл. На хорошо обеспеченной подвижными формами фосфора и калия почве прибавка урожая пшеницы сорта Симбирка от P60K60 в среднем за 4 года составила  $\approx 1$  ц/га, от N30P60K60 — 3 ц/га (с изменениями от 2-х до 8-ми ц/га) [8]. Долевое участие минеральных удобрений в формировании урожая яровой пшеницы сортов Крепыш и Приокская в благоприятные годы на опытном поле Марийского НИИСХ составляло 76–80%, в засушливые годы снижалось до 43–52% [9]. Однако и без внесения минеральных удобрений в наших опытах при дефиците влаги, который складывался в 4-й ротации, урожайность пшеницы по сравнению с 3-й ротацией снижалась: на фоне извести + навоза — с 25.8 до 15.0 ц/га (на 42%), навоза — с 25.2 до 16.2 (на 36%), извести — с 23.8 до 9.4 (на 60%), нулевом фоне — с 22.2 до 10.5 ц/га (на 53%). Прибавки от минеральных удобрений также наибольшими были в вариантах с NPK и небольшим снижением в вариантах NP и NK. Лишь в варианте PK на фоне извести с навозом прибавка была не достоверной.

В 6-й ротации урожайность по фонам наибольшей величины достигла в варианте с полным NPK-удобрением, на 2-м месте был вариант с внесением только азота (на нулевом фоне — калия). На 3-м месте был вариант с внесением фосфора, однако на фоне извести прибавка практически отсутствовала. Более наглядными были изменения урожайности пшеницы в зависимости от уровня минеральных удобрений в 6-й ротации. Эффективность их на всех фонах была высокой. На нулевом фоне урожайность пшеницы повышалась до уровня варианта применения N50P50K50, на фоне извести — до варианта N40P40K40, на фоне навоза — до варианта N30P30K30. Наибольшая урожайность на фоне навоза была получена при применении N60P60K60, на фоне извести + навоза — до дозы N60P60K60, причем на этом фоне прибавки были самыми высокими — от 5.1 до 9.2 ц/га. Из парных вариантов лучшее действие

**Таблица 2.** Урожайность яровой пшеницы в севообороте стационарного опыта (средние в 2-х закладках), ц/га

| Ротация,<br>год   | Вариант       | Нулевой фон                                               |          | Известь по 1 + 2 $H_r$ |          | Навоз 40 +<br>+ по 60 т/га |          | Известь 1 + 2 $H_r$ +<br>+ навоз 40 + 60 т/га |          |
|-------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|----------|------------------------|----------|----------------------------|----------|-----------------------------------------------|----------|
|                   |               | урожай-<br>ность                                          | прибавка | урожай-<br>ность       | прибавка | урожай-<br>ность           | прибавка | урожай-<br>ность                              | прибавка |
| 1-я,<br>1974–1975 | Без удобрений | —                                                         | —        | 13.0                   | —        | 14.2                       | —        | 13.9                                          | —        |
|                   | N90P60        | —                                                         | —        | 17.2                   | 4.2      | 16.2                       | 2.0      | 17.4                                          | 3.5      |
|                   | N90K60        | —                                                         | —        | 15.6                   | 2.6      | 14.4                       | –0.2     | 16.3                                          | 2.4      |
|                   | P60K60        | —                                                         | —        | 14.0                   | 1.0      | 15.8                       | 1.6      | 15.3                                          | 1.4      |
|                   | N90P60K60     | —                                                         | —        | 18.0                   | 5.0      | 17.6                       | 3.4      | 18.4                                          | 4.5      |
|                   | $HCP_{05}$    | фонов – 0.8, вариантов – 1.5, частных различий – 2.6 ц/га |          |                        |          |                            |          |                                               |          |
| 2-я,<br>1982–1983 | Без удобрений | 17.3                                                      | —        | 16.2                   | —        | 19.0                       | —        | 18.0                                          | —        |
|                   | N120P90       | 18.3                                                      | 1.0      | 16.9                   | 0.7      | 18.5                       | –0.5     | 17.0                                          | –1.0     |
|                   | N120K90       | 19.5                                                      | 2.2      | 16.7                   | 0.5      | 18.3                       | –0.7     | 17.2                                          | –0.8     |
|                   | P90K90        | 21.4                                                      | 4.1      | 20.1                   | 3.9      | 22.0                       | 3.0      | 20.4                                          | 2.4      |
|                   | N120P90K90    | 19.1                                                      | 1.8      | 18.7                   | 2.5      | 19.7                       | 0.7      | 18.0                                          | 0        |
|                   | $HCP_{05}$    | фонов – 0.8, вариантов – 1.0, частных различий – 2.5 ц/га |          |                        |          |                            |          |                                               |          |
| 3-я,<br>1990–1991 | Без удобрений | 22.2                                                      | —        | 23.8                   | —        | 25.2                       | —        | 25.8                                          | —        |
|                   | N90P60        | 27.8                                                      | 5.6      | 30.8                   | 7.0      | 31.0                       | 5.8      | 33.6                                          | 7.8      |
|                   | N90K60        | 26.1                                                      | 3.9      | 27.7                   | 3.9      | 29.0                       | 3.8      | 30.4                                          | 4.6      |
|                   | P90K60        | 24.6                                                      | 2.4      | 27.0                   | 3.2      | 27.8                       | 2.6      | 29.4                                          | 3.6      |
|                   | N90P60K60     | 32.2                                                      | 10.0     | 33.4                   | 9.6      | 35.0                       | 9.8      | 36.4                                          | 10.6     |
|                   | $HCP_{05}$    | фонов – 0.7, вариантов – 0.9, частных различий – 2.3 ц/га |          |                        |          |                            |          |                                               |          |
| 4-я,<br>1998–1999 | Без удобрений | 10.5                                                      | —        | 9.4                    | —        | 16.2                       | —        | 15.0                                          | —        |
|                   | N60P120       | 13.8                                                      | 3.3      | 12.8                   | 3.4      | 17.9                       | 1.7      | 17.7                                          | 2.7      |
|                   | N60K120       | 14.1                                                      | 3.6      | 13.4                   | 4.0      | 17.6                       | 1.4      | 17.2                                          | 2.2      |
|                   | P120K120      | 12.0                                                      | 1.5      | 11.4                   | 2.0      | 18.1                       | 1.9      | 15.7                                          | 0.7      |
|                   | N60P120K120   | 16.2                                                      | 5.7      | 13.2                   | 3.8      | 20.0                       | 3.8      | 20.2                                          | 5.2      |
|                   | $HCP_{05}$    | фонов – 0.6, вариантов – 0.8, частных различий – 2.0 ц/га |          |                        |          |                            |          |                                               |          |
| 5-я,<br>2006–2007 | Без удобрений | 16.2                                                      | —        | 15.4                   | —        | 20.6                       | —        | 18.9                                          | —        |
|                   | N40           | 20.8                                                      | 4.6      | 24.5                   | 9.1      | 27.6                       | 7.0      | 25.6                                          | 6.7      |
|                   | P40           | 18.4                                                      | 2.2      | 15.7                   | 0.3      | 22.9                       | 2.3      | 24.8                                          | 5.9      |
|                   | K40           | 22.2                                                      | 6.0      | 17.8                   | 2.4      | 23.8                       | 3.2      | 24.2                                          | 5.3      |
|                   | N40P40K40     | 28.0                                                      | 11.8     | 25.4                   | 10.0     | 27.4                       | 6.8      | 29.0                                          | 10.1     |
|                   | $HCP_{05}$    | фонов – 1.0, вариантов – 1.4, частных различий – 3.5 ц/га |          |                        |          |                            |          |                                               |          |
| 6-я,<br>2013–2014 | Без удобрений | 13.8                                                      | —        | 15.0                   | —        | 17.6                       | —        | 15.9                                          | —        |
|                   | N40P40        | 18.1                                                      | 4.3      | 17.1                   | 2.1      | 19.8                       | 2.2      | 19.6                                          | 3.7      |
|                   | N40K40        | 17.7                                                      | 3.9      | 17.5                   | 2.5      | 19.8                       | 2.2      | 17.7                                          | 1.8      |
|                   | P40K40        | 15.6                                                      | 1.8      | 16.8                   | 1.8      | 19.7                       | 2.1      | 16.7                                          | 0.8      |
|                   | N10P10K10     | 18.7                                                      | 4.9      | 18.3                   | 3.3      | 21.6                       | 4.0      | 22.1                                          | 6.2      |
|                   | N20P20K20     | 18.2                                                      | 4.4      | 17.2                   | 2.2      | 20.8                       | 3.2      | 21.0                                          | 5.1      |
|                   | N30P30K30     | 18.9                                                      | 5.1      | 17.9                   | 2.9      | 22.5                       | 4.9      | 22.1                                          | 6.2      |
|                   | N40P40K40     | 19.1                                                      | 5.3      | 18.4                   | 3.4      | 22.3                       | 4.7      | 22.1                                          | 6.2      |
|                   | N50P50K50     | 19.5                                                      | 5.7      | 18.2                   | 3.2      | 21.6                       | 4.0      | 22.8                                          | 6.9      |
|                   | N60P60K60     | 19.3                                                      | 5.5      | 18.2                   | 3.2      | 24.6                       | 7.0      | 25.1                                          | 9.2      |
|                   | $HCP_{05}$    | фонов – 0.5, вариантов – 0.7, частных различий – 1.8 ц/га |          |                        |          |                            |          |                                               |          |

**Таблица 3.** Окупаемость минеральных удобрений прибавкой урожая яровой пшеницы (средние 2-х закладок), кг зерна/кг NPK

| Ротация, год   | Вариант     | Внесено NPK | Нулевой фон | Известь по 1 + 2 $H_T$ | Навоз 40 + по 60 т/га | Известь по 1 + 2 $H_T$ + навоз 40 + по 60 т/га |
|----------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|-----------------------|------------------------------------------------|
| 1-я, 1974      | N90P60      | 150         | —           | 4.7                    | 3.1                   | 4.8                                            |
|                | N90K60      | 150         | —           | 2.9                    | 1.7                   | 3.3                                            |
|                | P60K60      | 120         | —           | −0.8                   | 2.3                   | 0.8                                            |
|                | N90P60K60   | 210         | —           | 3.7                    | 3.0                   | 3.3                                            |
| 2-я, 1982–1983 | N120P90     | 210         | 0.5         | 0.3                    | −0.2                  | −0.5                                           |
|                | N120K90     | 210         | 1.0         | 0.2                    | −0.3                  | −0.4                                           |
|                | P90K90      | 180         | 2.3         | 2.2                    | 1.7                   | 1.3                                            |
|                | N120P90K90  | 300         | 0.6         | 0.8                    | 0.2                   | 0                                              |
| 3-я, 1990–1991 | N90P60      | 150         | 3.7         | 4.7                    | 3.9                   | 5.2                                            |
|                | N90K60      | 150         | 2.6         | 2.6                    | 2.5                   | 3.1                                            |
|                | P60K60      | 120         | 2.0         | 2.7                    | 2.2                   | 3.0                                            |
|                | N90P60K60   | 210         | 4.8         | 4.6                    | 4.7                   | 5.0                                            |
| 4-я, 1998–1999 | N60P120     | 180         | 1.8         | 1.9                    | 0.9                   | 1.5                                            |
|                | N60K120     | 180         | 2.0         | 2.2                    | 0.8                   | 1.2                                            |
|                | P120K120    | 240         | 0.6         | 0.8                    | 0.8                   | 0.3                                            |
|                | N60P120K120 | 300         | 1.9         | 1.3                    | 1.3                   | 1.7                                            |
| 5-я, 2006–2007 | N40         | 40          | 11.5        | 22.8                   | 17.5                  | 16.8                                           |
|                | P40         | 40          | 15.0        | 6.0                    | 8.0                   | 13.2                                           |
|                | K40         | 40          | 5.5         | 0.8                    | 5.8                   | 14.8                                           |
|                | N40P40K40   | 120         | 9.8         | 8.3                    | 5.7                   | 8.4                                            |
| 6-я, 2013–2014 | N40P40      | 80          | 5.4         | 2.6                    | 2.9                   | 4.8                                            |
|                | N40K40      | 80          | 4.9         | 3.1                    | 2.8                   | 2.4                                            |
|                | P40K40      | 80          | 2.2         | 2.1                    | 2.8                   | 1.1                                            |
|                | N10P10K10   | 30          | 16.3        | 11.0                   | 13.3                  | 21.0                                           |
|                | N20P20K20   | 60          | 7.3         | 3.7                    | 5.5                   | 8.7                                            |
|                | N30P30K30   | 90          | 5.7         | 3.2                    | 5.4                   | 6.9                                            |
|                | N40P40K40   | 120         | 4.4         | 2.8                    | 3.9                   | 5.2                                            |
|                | N50P50K50   | 150         | 3.8         | 2.1                    | 2.7                   | 4.6                                            |
|                | N60P60K60   | 180         | 3.1         | 1.8                    | 3.9                   | 5.2                                            |

на урожайность оказали NP- и NK-варианты. По данным работы [10], на дерново-подзолистой суглинистой почве опытного поля Ижевского ГСХА наибольшая урожайность яровой пшеницы Иргина, почти 30 ц/га, в благоприятном году была получена при использовании минеральных удобрений в дозе N90P45K45 на фоне заправки зеленой массы рапса. В неблагоприятные по гидротермическим условиям годы более высокая урожайность (17–18 ц/га) сформировалась при той же дозе удобрений на фоне внесения соломы в качестве удобрения. В работе [11] (НИИСХ Северо-Востока) пришли к выводу, что урожайность большинства сортов яровой пшеницы воз-

растала до дозы N90P90K90, сорта Свеча — до дозы N60P60K60. Окупаемость 1 кг д.в. внесенных удобрений зерном пшеницы в среднем за 18 лет составила 3.6–8.0 кг/кг. В работе [12] (Пермский НИИСХ) установили, что минеральные удобрения в дозах N30P30K30–N150P150K150 способствовали повышению урожайности яровой пшеницы сорта Горноуральская на 3–17 ц/га по сравнению с контролем.

Окупаемость удобрений зависела от величины урожайности пшеницы и доз внесенных удобрений. В засушливые годы с резким снижением урожайности, а также с повышением доз удобрений их окупаемость прибавкой урожая снижа-

лась. В относительно благоприятных погодных условиях 1974 г. (1-я ротация), несмотря на внесение высоких доз удобрений величина окупаемости удобрений в зависимости от фона, хотя и была невысокой, но менялась в пределах удовлетворительных показателей: в варианте с внесением NPK в дозе 210 кг/га — 3.0–3.7, NP в дозе 150 кг/га — 3.1–4.8 кг/кг (табл. 3). Во 2-й ротации севооборота дозы удобрений были увеличены до 300 кг д.в. NPK/га и до 210 кг/га — NP и NK. К тому же засуха в одной из закладок опыта (в 1982 г.) отрицательно повлияла на урожайность. В результате показатели окупаемости удобрений в среднем за 2 года снизились практически до нуля, за исключением варианта с внесением 180 кг PK/га, где окупаемость составила 1.3–2.3 кг/кг вследствие большей урожайности.

Третья ротация по дозам удобрений была одинаковой с 1-й, а условия в среднем лишь немного лучше. Окупаемость удобрений в парных вариантах изменялась незначительно, в варианте NPK показатели увеличились до 4.6–5.0 против 3.0–3.7 кг/кг в 1-й ротации. Практически такой же была окупаемость NP-удобрений на фонах извести и извести + навоза. В 4-й ротации вследствие низкой урожайности пшеницы при дефиците влаги, окупаемость удобрений составила всего 0.3–2.2 кг/кг.

Значительно выше окупаемость 1 кг NPK-удобрений прибавкой урожая была в 5-й ротации севооборота, что связано с повышением урожайности и снижением доз удобрений до 40 кг д.в. каждого элемента/га. Окупаемость полного минерального удобрения N40P40K40 составила: на фоне без внесения извести и навоза — 9.8 кг зерна/кг NPK, на известкованном и известково-унавоженном фонах — 8.3–8.4, на фоне навоза — 5.7 кг/кг. В варианте N40 на фоне без извести и навоза (нулевой фон) окупаемость увеличилась до 11.5, на фоне извести — до 22.8 на унавоженных фонах — до 16.8–17.5 кг/кг. Наибольшая окупаемость фосфора в дозе 40 кг/га была получена на нулевом фоне (15.0) и на фоне извести с навозом — 13.2, калия — на фоне извести с навозом (14.8 кг/кг). Высокие показатели окупаемости яровой пшеницы были получены и в Республике Татарстан [13]. Расчеты проведены на основе временных рядов урожайности за 1964–2005 и 1964–2016 гг. отдельно минеральных, органических удобрений и их суммы в кг д.в. NPK в масштабе республики с использованием скользящих средних урожайности при длине шага 11 и 22 года. Получен следующий результат: для минеральных удобрений — 10.6–11.2, для органических — 13.3–18.7 и для их суммы — 5.3–7.0 кг зерна/кг удобрений.

Более показательными были усредненные данные двух закладок опыта в 6-й ротации севооборота, урожайность в которых из-за погодных условий резко отличалась. Кроме того, более детально изучали влияние доз удобрений. При внесении наименьших доз минеральных удобрений (N10P10K10) окупаемость их на разных фонах варьировала в пределах от 11.0 до 21.0 кг/кг. В опыте [8] при использовании дозы N20P10K10 окупаемость удобрений достигла величины 12.1 кг/кг. С повышением доз окупаемость снижалась. В наших опытах в среднем в зависимости от фона она составила: при N10P10K10 — 15.4, N20P20K20 — 6.3, N30P30K30 — 5.3, N40P40K40 — 4.0, N50P50K50 — 3.3, N60P60K60 — 3.5 кг/кг.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительные исследования на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах Удмуртской Республики показали, что в благоприятные годы по количеству выпавших осадков на удобренных почвах урожайность яровой пшеницы может достигать 41 ц/га (36.4 ц/га в среднем за 2 года). При недостаточном количестве осадков урожайность снижалась до 18 ц/га и менее. Наибольшая урожайность пшеницы формировалась на известково-унавоженном фоне, далее — на унавоженном, известкованном и меньшая — на нулевом (без извести и навоза) фоне. На перечисленных фонах внесение полного минерального удобрения (NPK) обеспечивало получение наибольшей урожайности. С повышением удобренности фона оптимальная доза применения минеральных удобрений снижалась: с N50P50K50 на нулевом фоне и N40P40K40 на фоне извести до N30P30K30 на фоне навоза и N10P10K10 на фоне извести + навоза. Увеличение доз до N60P60K60 на известкованных фонах повышало урожайность яровой пшеницы.

Данные окупаемости удобрений свидетельствовали о ее зависимости от величины урожайности пшеницы и доз удобрений. С учетом уровня развития хозяйств, для получения урожайности зерна пшеницы 20–30 ц/га им рекомендуется вносить NPK от 10 до 60 кг д.в. каждого элемента/га, что может обеспечить получение окупаемости удобрений в пределах с 21 до 5 кг/кг на фоне извести с навозом, с 13 до 4 кг/кг на фоне навоза, с 16 до 3 кг/кг на нулевом и известкованном фонах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыскова И.В. Влияние минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, урожай-

- ность и качество зерновых культур // Аграр. наука Евро-Северо-Востока. 2017. № 6 (61). С. 35–40.
2. Асеева Т.А., Савченко Н.Е., Суняйкин А.А. Повышение окупаемости минеральных удобрений при возделывании зерновых культур в условиях Среднего Приамурья // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 3. С. 27–28.
  3. Soon Y.K. Nutrients uptake by barley roots under field conditions // Plant Soil. 1988. V. 109. № 2. P. 171–179.
  4. Кирюшин В.И. Концепция адаптивно-ландшафтного земледелия. Пушкино: Пушкинский научн. центр РАН, 1993. 64 с.
  5. Дзюин Г.П., Дзюин А.Г. Модели адаптивно-ландшафтных систем земледелия в Вятско-Камской ландшафтной провинции: Монография. Ижевск: Ижевская ГСХА, 2010. 279 с.
  6. Adamus M., Drozd J., Stanislawska E. Wplyw zroznikowanego nawozenia organicznego i mineralnego na niektore elementy zuznosci gleby // Roczn gleboznawcze. Warszawa, 1990. T. 40. № 1. S. 108–109.
  7. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1973. 336 с.
  8. Бердников В.В. Влияние удобрений и биопрепаратов на продуктивность яровой пшеницы в условиях Республики Марий Эл: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саранск, 2002. 16 с.
  9. Лапшин Ю.А. Урожайность яровой пшеницы в зависимости от погоды, удобрений и вида агроценоза // Бюл. ВИУА. 2002. № 116. С. 273–215.
  10. Макаров В.И., Шишкина Г.М., Шкляева М.А. Урожайность яровой пшеницы в связи с содержанием питательных веществ в почве и листьях // Агрохимия и экология, история и современность: Мат-лы Международ. научн.- практ. конф. Т. 1. Нижегород. ГСХА. Н.Новгород: Изд-во ВВАГАС, 2008. С. 173–176.
  11. Абашев В.Д., Попов Ф.А., Носкова Е.Н., Жук С.Н. // Влияние минеральных удобрений на урожайность зерна яровой пшеницы // Перм. Аграрн. вестн. 2017. № 1 (17). С. 7–11.
  12. Косолапова А.И., Возжаев В.И., Лейних П.А. Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от применения удобрений // Перм. Аграрн. вестн. 2017. № 3 (19). С. 76–79.
  13. Давлятишин И.Д., Лукманов А.А. Урожайность яровой пшеницы и окупаемость удобрений // Научн. журн. "Почвоведение и агрохимия". Казах. научн.-исслед. ин-т почвовед. и агрохим. им. У.У. Усманова, 2017. № 3. С. 68–75.

## Influence of Mineral Fertilizers and Weather Conditions on the Yield of Spring Wheat and the Payback of Fertilizers in a Long-Term Stationary Experiment

A. G. Dzyuin

*Udmurt Federal Research Center Ural Branch of the RAS  
ul. Lenina 1, Zavyalovsky district, v. Pervomaisky, Izhevsk 427007, Udmurt Republic, Russia*

*E-mail: ugnish@yandex.ru*

The areas under crops of spring wheat in the Udmurt Republic, as well as in the North-Eastern zone of Non-Black Earth Russia, to which it is a part of its territory, have tended to expand in recent years. For 15 years in the republic, they have increased by 30 thousand hectares. However, due to low soil fertility, more frequent summer droughts, insufficient use of fertilizers, wheat yield remains low (about 14 kg ha on average over the past 10–12 years). An increase in its yield is possible by regulating the system of applying fertilizers. In this regard, the purpose of the work was to identify rational doses and a system of fertilization for spring wheat based on the analysis of the results of studies carried out in long-term stationary experience. The experience was laid in 1971–1972, on soddy-medium-podzolic medium-loamy soil in 2 tabs with indicators:  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  5.0, hydrolytic acidity ( $H_a$ ) – 2.7,  $S$  – 14.8 mg-eq/100 g,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 52.0,  $\text{K}_2\text{O}$  – 92 mg/ kg soil, humus – 2.5%, 6 rotations of an 8-field crop rotation with crop alternation took place: black fallow, winter rye, potatoes in 1–3 rotations and corn in 4–5 rotations, spring wheat + clover, clover 1 year of use, clover 2 year of use, winter rye, barley. Experiment scheme: factor  $A$  – backgrounds: 0 – zero,  $\text{Lim}^2$  – lime at 1  $H_a$  in the 1<sup>st</sup> + 2  $H_a$  each in the 2<sup>nd</sup> rotations,  $\text{Man}^5\text{Gr}$  man – manure 40 t/ha in 1<sup>st</sup> + 60 t/ha in 2–5 rotations + green manure in 6<sup>th</sup> rotation,  $\text{Lim}^2\text{Man}^5\text{Gr}$  man – in appropriate combinations. Factor  $B$  – mineral fertilizers. The experiment was repeated 4 times. Meteorological conditions – according to the data of the Central Geological Survey “Izhevsk”. In favorable weather years, the yield of spring wheat on fertilized soils reached 36–41 c/ha. With a lack of precipitation, it dropped to 18 c/ha and more. The largest one was formed against a lime-fertilized background, then against a manured background and less against a lime-covered and zero background with the introduction of complete (NPK) fertilization with some decrease in the series of NP-, NK- and PK-fer-

tilizers. In the fertilization system, the optimal doses for wheat were: against a zero background N50P50K50, against a background of lime N40P40K40, against a background of manure N30P30K30, against a background of lime + manure N10P10K10. Against the background of manure and, especially, lime + manure, the efficiency of N60P60K60 increased. Farms, depending on the conditions of their development, in order to obtain 20–30 c ha of spring wheat on the appropriate backgrounds, are recommended to apply mineral fertilizers in doses from 10 to 60 kg active substance/ha of N, P and K, which can provide a level of their payback in the range from 21 to 5 against the background of lime with manure, from 13 to 4 against the background of manure, and from 16 to 3 kg/kg against zero and lime backgrounds, according to the doses.

*Key words:* crop rotation, spring wheat, yield, meteorological conditions, doses of fertilizers, lime, manure, payback of fertilizers

УДК 631.8:631.816.36:633.15

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЯ ВУКСАЛ МАКРОМИКС ДЛЯ НЕКОРНЕВОЙ ПОДКОРМКИ КУКУРУЗЫ

© 2021 г. В. Н. Багринцева<sup>1</sup>, \*, И. А. Шмалько<sup>1</sup><sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт кукурузы 357528 Пятигорск, ул. Ермолова, 14б, Россия

\*E-mail: maize-techno@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021 г.

После доработки 20.02.2021 г.

Принята к публикации 10.03.2021 г.

В Ставропольском крае на типичных черноземах в 2018–2020 гг. изучали эффективность некорневой подкормки растений кукурузы в фазе 7–8 листьев удобрением Вуксал Макромикс (2.5 л/га) на фоне применения минеральных удобрений N30 и N30P30K30, а также и без них. Некорневая подкормка минеральным удобрением Вуксал Макромикс (2.5 л/га) повысила в среднем за 2018–2020 гг. урожайность зеленой массы раннеспелого гибрида кукурузы Машук 185 МВ на 4.5 т/га (на 14.0%), среднераннего Машук 220 МВ – на 6.19 т/га (на 22.8%), среднеспелого Машук 355 МВ – на 4.44 т/га (на 13.3%). Получены прибавки урожая зерна гибрида Машук 185 МВ 0.48 т/га (на 8.0%), Машук 220 МВ – 0.60 т/га (на 11.0%), Машук 355 МВ – 0.69 т/га (на 11.5%). Некорневая подкормка растений удобрением Вуксал Макромикс без минеральных удобрений увеличивала число зерен в початках, в среднем за 3 года у гибрида Машук 185 МВ оно возросло на 13, Машук 220 МВ – на 38, Машук 355 МВ – на 27 шт. За счет увеличения числа зерен масса початков повышалась соответственно на 4.7, 7.8, 11.1 г. При подкормке растений на фоне внесения в почву аммиачной селитры в дозе N30 прибавки урожая зеленой массы увеличивались по сравнению с применением одного азота у разных гибридов кукурузы на 0.78–1.38 т/га. При этом на фоне внесения в почву N<sub>aa</sub> подкормка растений кукурузы не обеспечивала рост прибавок урожая зерна по сравнению с применением азотного удобрения. Выявлена зависимость эффективности некорневой подкормки растений удобрением Вуксал Макромикс на фоне нитроаммофоски в дозе N30P30K30 от биологических особенностей гибридов кукурузы. Существенный рост прибавки урожая зерна на 0.42 т/га наблюдали только у раннеспелого гибрида Машук 185 МВ.

**Ключевые слова:** кукуруза, удобрение Вуксал Макромикс, некорневая подкормка, урожайность, зеленая масса, зерно.

**DOI:** 10.31857/S0002188121070036

### ВВЕДЕНИЕ

Минеральные удобрения – это эффективное средство повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Внесение их в почву является наиболее распространенным способом снабжения растений кукурузы необходимыми элементами питания [1–5]. Однако в последние годы возрастает интерес к применению различных минеральных и органо-минеральных удобрений для улучшения условий питания растений полезными веществами через лист. Кроме макро- и микроэлементов многие из них содержат аминокислоты, витамины, природные гормоны, ростстимулирующие и др. вещества. Современные, наиболее эффективные агрохимикаты для некорневых подкормок растений представляют собой сложные многокомпонентные и многофункциональные продукты с инновационными решения-

ми. Мировая тенденция роста производства растениеводческой продукции направлена на научно обоснованное применение экономически эффективных и экологически безопасных агрохимикатов [6].

Некорневые подкормки агрохимикатами во время вегетации растений существенно повышают урожайность зеленой массы и зерна кукурузы [7–10]. Однако, несмотря на многочисленные исследования эффективности некорневых подкормок растений минеральными и органо-минеральными удобрениями, многое в технологии их использования не достаточно глубоко изучено. Часто в сельхозпредприятиях для получения наибольшего эффекта применяют некорневые подкормки растений на фоне минеральных удобрений. При этом не учитывают концентрации макроэлементов в жидких удобрениях для подкормок.

Не изучен вопрос о возможном взаимодействии агрохимикатов, применяемых для листовых подкормок, с минеральными удобрениями, внесенными до посева кукурузы в почву. В данном случае, при совместном применении минеральных удобрений и агрохимикатов в подкормки возможен эффект несовместимости или пере-насыщения растений питательными веществами и снижение урожайности вместо повышения. В научной литературе, например, имеются сведения о том, что на черноземных почвах некорневые подкормки зерновых колосовых культур агрохимикатами эффективны только на неудобренном фоне [11, 12].

Большое практическое значение имеет сравнительное изучение эффективности некорневых подкормок растений и внесения твердых минеральных удобрений в почву. Подобные исследования позволили бы ответить на вопрос, можно ли некорневой подкормкой растений добиться такого же эффекта, как и от традиционного применения минеральных удобрений. Ввиду высокой стоимости твердых минеральных удобрений, а также в связи с различными потерями элементов питания из почвы, замена корневого питания растений некорневым очень актуальна.

При применении как минеральных удобрений, так и агрохимикатов, для подкормки кукурузы следует учитывать способность растений различных гибридов усваивать питательные вещества и трансформировать их в более высокий урожай. Специфическая реакция сортов и гибридов кукурузы на удобрения доказана многими учеными [13–15].

В связи с разной отзывчивостью гибридов кукурузы не только на внесение минеральных удобрений в почву, но и на некорневые подкормки растений [8, 16–18], исследования необходимо проводить на гибридах разных групп спелости.

Цель работы — изучение влияния некорневой подкормки растений удобрением Вуксал Макромикс (2.5 л/га) на фоне применения минеральных удобрений N30 и N30P30K30, а также без них на урожайность гибридов кукурузы разных групп спелости.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые опыты проводили в 2018–2020 гг. на опытном поле Всероссийского НИИ кукурузы в зоне достаточного увлажнения Ставропольского края. Схема опыта представлена в таблицах.

Удобрения N<sub>aa</sub>30 и НАФК (N30P30K30) внесли под предпосевную культивацию. Указанные

дозы минеральных удобрений под кукурузу в Ставропольском крае при современных ценах считаются экономически наиболее эффективными [1, 16, 17].

Вуксал Макромикс — минеральное удобрение для некорневой подкормки кукурузы, имеющее в составе макроэлементы (N — 241, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 241, K<sub>2</sub>O — 181 г/л) и микроэлементы (B — 0.3, Cu — 0.76, Fe — 1.51, Mn — 0.76, Mo — 0.015, Zn — 0.76 г/л). Препаративная форма — суспензия с дополнительными эффектами pH-корректора и прилипателя.

Исследование проводили на гибридах кукурузы разных групп спелости: раннеспелом Машук 185 МВ (ФАО 185), среднераннем Машук 220 МВ (ФАО 220) и среднеспелом Машук 355 МВ (ФАО 350).

Площадь делянки, занимаемая одним гибридом кукурузы, равна 19.6 м<sup>2</sup> (7.0 м × 2.8 м), учетной — 9.8 м<sup>2</sup> (7.0 м × 1.4 м). Повторность в опыте четырехкратная.

Предшественником кукурузы в опытах была озимая пшеница. Основная обработка почвы — отвальная. После уборки предшественника проведено двукратное лущение стерни, осенью — вспашка. Весной до посева проведено 2 культивации. Сеяли кукурузу в 2018 г. 28 апреля, в 2019 г. — 29 апреля, в 2020 г. — 30 апреля сеялкой УПС-8. Всходы кукурузы в 2018 г. появились 6 мая, в 2019 г. — 10 мая, в 2020 г. — 11 мая. После появления всходов в фазе 2–3 листьев формировали оптимальную густоту стояния растений: для гибрида Машук 185 МВ — 80, Машук 220 МВ — 70, Машук 355 МВ — 60 тыс. шт./га. Для борьбы с сорными растениями посев кукурузы в фазе 3-х листьев обработали гербицидом Аденго (0.5 л/га). С целью рыхления почвы в фазе 7–8 листьев провели междурядную культивацию.

Некорневую подкормку растений кукурузы удобрением Вуксал Макромикс проводили после междурядной культивации в фазе 7–8 листьев опрыскивателем ОП-2500 серии АРГО при расходе рабочего раствора 250 л/га.

Среднее многолетнее количество осадков за период вегетации кукурузы составило 343.6 мм, в том числе: в мае — 79.4, июне — 87.1, июле — 70.4, августе — 58.7, сентябре — 48 мм (табл. 1). В 2018–2020 гг. осадков за май–сентябрь (период вегетации кукурузы) выпадало меньше среднего многолетнего количества: в 2018 г. — на 47.1 мм (на 13.7%), в 2019 г. — на 41.5 мм (на 12.1%), в 2020 г. — на 71.3 мм (на 20.8%).

В 2018 г. недостаток влаги наблюдали во 2-й и 3-й декадах июня, после некорневой подкормки



**Таблица 1.** Погодные условия в период вегетации кукурузы

| Месяц        | Осадки, мм                 |         |         |         | Температура, °С            |         |         |         | ГТК                        |         |         |         |
|--------------|----------------------------|---------|---------|---------|----------------------------|---------|---------|---------|----------------------------|---------|---------|---------|
|              | средне<br>много-<br>летние | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. | средне<br>много-<br>летняя | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. | средне<br>много-<br>летний | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. |
| Май          | 79.4                       | 80.2    | 50.6    | 138.7   | 14.6                       | 17.9    | 17.0    | 15.2    | 1.75                       | 1.49    | 0.96    | 2.94    |
| Июнь         | 87.1                       | 79.8    | 71.0    | 45.0    | 18.2                       | 21.6    | 21.9    | 21.7    | 1.60                       | 1.23    | 1.08    | 0.69    |
| Июль         | 70.4                       | 64.6    | 114.0   | 18.0    | 20.8                       | 24.5    | 21.8    | 24.0    | 1.09                       | 0.85    | 1.69    | 0.24    |
| Август       | 58.7                       | 38.9    | 16.0    | 65.1    | 20.4                       | 21.3    | 21.9    | 21.9    | 0.93                       | 0.59    | 0.23    | 0.96    |
| Сентябрь     | 48.0                       | 20.5    | 50.2    | 5.5     | 15.5                       | 19.5    | 15.8    | 18.3    | 1.03                       | 0.35    | 1.06    | 0.10    |
| Май–сентябрь | 343.6                      | 296.5   | 302.1   | 272.3   | 16.4                       | 19.1    | 19.7    | 20.2    | 1.37                       | 1.01    | 1.00    | 0.88    |

и во время интенсивного роста растений, а также в 1-й–2-й декадах июля во время цветения кукурузы. В 2019 г. условия увлажнения были более благоприятными для кукурузы по сравнению с предыдущим годом, осадки выпадали регулярно, в критические периоды роста и развития растений (в июне–июле) их было достаточно. Из 3-х лет исследования 2020 г. для кукурузы был самым неблагоприятным и засушливым ввиду недостаточного количества осадков в июне и июле.

Среднесуточная температура воздуха в течение вегетации кукурузы в годы исследования была выше средней многолетней: в 2018 г. – на 3.1°С, в 2019 г. – на 1.8°С, в 2020 г. – на 2.3°С. Гидротермический коэффициент в годы проведения опытов как по месяцам, так и за весь период вегетации, был ниже среднего многолетнего.

Почва опытного участка – чернозем обыкновенный карбонатный мощный тяжелосуглинистый. Объемная масса метрового слоя почвы в среднем составляет 1.25 г/м<sup>3</sup>. Реакция почвенного раствора гумусового горизонта щелочная (рН<sub>H<sub>2</sub>O</sub> 7.5). Содержание гумуса в слое почвы 0–20 см – ≈4.7%.

Образцы почвы для анализа на содержание элементов питания в слое 0–20 см отбирали после внесения минеральных удобрений перед проведением некорневой подкормки растений. В среднем за 3 года исследования содержание нитратного азота в почве контроля составило: 17.5, подвижного фосфора – 12, обменного калия – 272 мг/кг (табл. 2).

Согласно принятой в Ставропольском крае градации, в почве делянок без удобрений содержание нитратного азота, а также подвижного фосфора по Мачигину было низким, обменного калия – средним [19]. Внесенные до посева кукурузы минеральные удобрения повысили содержание элементов питания в почве. В среднем за го-

ды исследования содержание нитратного азота в почве варианта с внесением N<sub>aa</sub>30 составило 24.4, подвижного фосфора – 13.4, обменного калия – 296 мг/кг, в варианте с внесением НАФК – соответственно 29.4, 19.3, 310 мг/кг.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение минеральных удобрений и некорневая подкормка удобрением Вуксал Макромикс оказали положительное влияние на рост растений гибридов кукурузы (табл. 3).

Отмечено увеличение высоты растений всех 3-х гибридов кукурузы. Однако действие удобрений и подкормки Вуксал Макромикс на рост растений среднераннего и среднеспелого гибридов было более значительным. В среднем за годы наблюдений наименьшее увеличение высоты растений на 5–9 см наблюдали при внесении в почву N<sub>aa</sub>30. Внесение в почву НАФК в дозе N30P30K30 увеличивало высоту растений гибридов кукурузы на 7–12 см. Некорневая подкормка растений вызывала увеличение их высоты на 7–14 см. При применении удобрения Вуксал Макромикс на фоне N30 и N30P30K30 растения кукурузы были выше, чем без них на 1–3 см, что было не существенным.

**Таблица 2.** Содержание элементов питания в слое 0–20 см почвы, мг/кг

| Вариант       | N-NO <sub>3</sub> |      |      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |      |      | K <sub>2</sub> O |     |     |
|---------------|-------------------|------|------|-------------------------------|------|------|------------------|-----|-----|
|               | 1                 | 2    | 3    | 1                             | 2    | 3    | 1                | 2   | 3   |
| Без удобрений | 17.4              | 17.6 | 17.6 | 15.0                          | 12.0 | 9.0  | 311              | 270 | 235 |
| N30           | 26.3              | 24.0 | 22.8 | 16.3                          | 14.0 | 10.0 | 330              | 291 | 266 |
| N30P30K30     | 24.3              | 33.9 | 30.0 | 17.0                          | 26.0 | 15.0 | 344              | 295 | 291 |

Примечание. В графе 1 – 2018 г., 2 – 2019 г., 3 – 2020 г.

Таблица 3. Влияние удобрений на высоту растений кукурузы, см

| Вариант                                 | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. | Средние |          |
|-----------------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                                         |         |         |         | высота  | прибавка |
| Гибрид Машук 185 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 200     | 225     | 209     | 211     | —        |
| N30                                     | 205     | 230     | 212     | 216     | 5        |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 212     | 230     | 209     | 217     | 6        |
| N30P30K30                               | 211     | 232     | 211     | 218     | 7        |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 212     | 234     | 215     | 220     | 9        |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 213     | 232     | 210     | 218     | 7        |
| HCP <sub>05</sub> , см                  | 6       | 4       | 5       | 5       |          |
| Гибрид Машук 220 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 192     | 206     | 200     | 199     | —        |
| N30                                     | 197     | 221     | 203     | 207     | 8        |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 198     | 221     | 207     | 209     | 10       |
| N30P30K30                               | 203     | 226     | 200     | 210     | 11       |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 209     | 227     | 204     | 213     | 14       |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 204     | 220     | 203     | 209     | 10       |
| HCP <sub>05</sub> , см                  | 6       | 4       | 7       | 7       |          |
| Гибрид Машук 355 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 208     | 235     | 208     | 217     | —        |
| N30                                     | 218     | 246     | 215     | 226     | 9        |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 222     | 247     | 218     | 229     | 12       |
| N30P30K30                               | 221     | 251     | 215     | 229     | 12       |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 225     | 247     | 224     | 232     | 15       |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 226     | 247     | 221     | 231     | 14       |
| HCP <sub>05</sub> , см                  | 5       | 4       | 8       | 6       |          |

Действие на рост растений кукурузы как минеральных удобрений, так и некорневой подкормки, было подвержено влиянию погодных условий и было разным в годы исследования. Например, в наиболее благоприятном по увлажнению 2019 г. в варианте применения аммиачной селитры высота растений гибридов увеличивалась на 5–15 см, в засушливом 2020 г. — на 3–7 см, в варианте применения нитроаммофоски — соответственно на 7–20 см и 2–7 см.

При некорневой подкормке удобрением Вуксал Макромикс увеличение высоты растений также было более значительным в 2019 г., варьируя у разных гибридов от 7 до 14 см.

Несмотря на различия погодных условий, во все годы под влиянием минеральных удобрений и некорневой подкормки удобрением Вуксал Макромикс увеличивалась урожайность зеленой массы кукурузы (табл. 4). В среднем внесение в почву N<sub>aa</sub> дало прибавку урожая зеленой массы гибрида

кукурузы Машук 185 МВ на 8.4%, Машук 220 МВ — на 22.6%, Машук 355 МВ — на 7.2%, внесение НАФК — соответственно на 21.4, 35.5, 16.8%. Некорневая подкормка растений существенно повышала урожайность зеленой массы гибридов кукурузы на 14.0, 22.8, 13.2%.

Следует отметить, что при подкормке растений удобрением Вуксал Макромикс на фоне внесения в почву N<sub>aa</sub> прибавки урожая зеленой массы всех 3-х гибридов кукурузы увеличивались по сравнению с применением одного минерального удобрения. Эту тенденцию наблюдали во все годы исследования, независимо от различий в погодных условиях, и на всех гибридах, независимо от продолжительности их вегетации. Однако увеличение прибавки урожая зеленой массы от подкормки растений удобрением Вуксал Макромикс на фоне N<sub>aa</sub> по отношению к контролю было незначительное. Обработка растений не способ-

**Таблица 4.** Влияние удобрений на урожай зеленой массы кукурузы и прибавку урожая, т/га

| Вариант                                 | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. | Средние |          |
|-----------------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                                         |         |         |         | урожай  | прибавка |
| Гибрид Машук 185 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 35.9    | 35.0    | 25.3    | 32.1    | —        |
| N30                                     | 38.1    | 36.9    | 29.3    | 34.7    | 2.7      |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 39.1    | 37.8    | 31.5    | 36.1    | 4.1      |
| N30P30K30                               | 43.2    | 44.7    | 28.8    | 38.9    | 6.9      |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 44.3    | 42.9    | 32.9    | 40.0    | 8.0      |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 40.3    | 38.3    | 31.2    | 36.6    | 4.5      |
| HCP <sub>05</sub> , т/га                | 3.9     | 4.3     | 3.7     | 3.2     |          |
| Гибрид Машук 220 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 29.1    | 27.7    | 24.6    | 27.1    | —        |
| N30                                     | 32.0    | 35.9    | 31.9    | 33.3    | 6.1      |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 29.9    | 37.0    | 36.5    | 34.5    | 7.4      |
| N30P30K30                               | 30.9    | 42.6    | 36.7    | 36.7    | 9.6      |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 29.0    | 43.0    | 36.5    | 36.2    | 9.1      |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 28.5    | 36.5    | 34.9    | 33.3    | 6.2      |
| HCP <sub>05</sub> , т/га                | 2.8     | 3.7     | 3.3     | 5.7     |          |
| Гибрид Машук 355 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 36.8    | 30.8    | 32.8    | 33.5    | —        |
| N30                                     | 34.7    | 38.6    | 34.3    | 35.9    | 2.4      |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 36.7    | 37.2    | 36.0    | 36.7    | 3.2      |
| N30P30K30                               | 37.4    | 41.5    | 38.4    | 39.1    | 5.6      |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 38.0    | 39.0    | 38.5    | 38.5    | 5.0      |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 40.1    | 37.2    | 36.5    | 37.9    | 4.4      |
| HCP <sub>05</sub> , т/га                | 4.0     | 4.4     | 4.0     | 3.7     |          |

ствовала достоверному увеличению зеленой массы по сравнению с вариантом N<sub>aa</sub>30.

Применение N30P30K30 на всех гибридах обеспечивало достоверную прибавку урожая зеленой массы по сравнению с контролем. Обработка Вуксал Макромикс не привела к достоверному росту зеленой массы, по сравнению с вариантом НАФК.

Необходимо отметить, что повышение урожайности зеленой массы всех гибридов кукурузы за счет некорневой подкормки было существенным и больше, чем от предпосевного внесения N<sub>aa</sub> в почву.

Минеральные удобрения и Вуксал Макромикс положительно влияли не только на урожайность зеленой массы, но и повышали урожайность зерна (табл. 5). В среднем за 3 года опыта при внесении в почву N<sub>aa</sub> прибавка урожая зерна гибрида кукурузы Машук 185 МВ была существенной и равнялась 8.5%. У гибрида Машук 220 МВ полу-

чена несущественная прибавка урожая зерна (4.2%). Прибавка урожая зерна гибрида Машук 355 МВ, равная 8.3%, была достоверной. Внесение НАФК повысило урожай зерна гибридов на 5.0, 7.9, 7.3%, и прибавки были существенными у гибридов Машук 220 МВ и Машук 355 МВ. Некорневая подкормка растений повышала урожай зерна этих гибридов достоверно на 8.0, 11.0, 11.5%. В среднем за 2018–2020 гг. прибавка урожая зерна гибрида Машук 220 МВ при подкормке удобрением Вуксал Макромикс (0.60 т/га) была существенно больше, чем при допосевном внесении N<sub>aa</sub> (0.23 т/га).

Подкормка растений кукурузы удобрением Вуксал Макромикс на фоне внесения N<sub>aa</sub> не обеспечивала рост прибавок урожая зерна. Подкормка растений удобрением Вуксал Макромикс в сочетании с допосевным внесением НАФК в почву в среднем за 3 года существенно (на 0.42 т/га) по-

**Таблица 5.** Влияние удобрений на урожай зерна и прибавку урожая кукурузы, т/га

| Вариант                                 | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. | Средние |          |
|-----------------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                                         |         |         |         | урожай  | прибавка |
| Гибрид Машук 185 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 6.07    | 7.95    | 3.88    | 5.97    | —        |
| N30                                     | 6.16    | 8.17    | 5.12    | 6.48    | 0.51     |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 5.98    | 8.14    | 5.14    | 6.42    | 0.45     |
| N30P30K30                               | 5.78    | 8.54    | 4.50    | 6.27    | 0.30     |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 6.46    | 8.32    | 5.30    | 6.69    | 0.72     |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 6.17    | 8.34    | 4.83    | 6.45    | 0.48     |
| <i>HCP</i> <sub>05</sub> , т/га         | 0.87    | 0.38    | 0.44    | 0.33    |          |
| Гибрид Машук 220 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 4.79    | 6.98    | 4.55    | 5.44    | —        |
| N30                                     | 4.85    | 7.53    | 4.64    | 5.67    | 0.23     |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 4.86    | 7.48    | 4.68    | 5.67    | 0.23     |
| N30P30K30                               | 5.47    | 7.76    | 4.38    | 5.87    | 0.43     |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 5.00    | 7.78    | 4.84    | 5.87    | 0.43     |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 5.68    | 7.60    | 4.92    | 6.04    | 0.60     |
| <i>HCP</i> <sub>05</sub> , т/га         | 0.71    | 0.30    | 0.36    | 0.29    |          |
| Гибрид Машук 355 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 5.90    | 7.71    | 4.39    | 6.00    | —        |
| N30                                     | 6.42    | 8.40    | 4.68    | 6.50    | 0.50     |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 6.69    | 7.61    | 4.96    | 6.42    | 0.42     |
| N30P30K30                               | 6.21    | 8.61    | 4.50    | 6.44    | 0.44     |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 5.62    | 7.83    | 5.09    | 6.18    | 0.18     |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 7.34    | 8.10    | 4.64    | 6.69    | 0.69     |
| <i>HCP</i> <sub>05</sub> , т/га         | 0.73    | 0.43    | 0.42    | 0.36    |          |

высила урожай зерна гибрида Машук 185 МВ. У остальных гибридов это не было отмечено.

На величину урожая зерна кукурузы сильное влияние оказали погодные условия во время вегетации, в основном влияла сумма осадков за июнь и июль. Например, в самом благоприятном для этой сельскохозяйственной культуры 2019 г. при применении минеральных удобрений и удобрения Вуксал Макромикс урожайность раннеспелого гибрида Машук 185 МВ варьировала от 8.14 до 8.54 т/га, среднераннего гибрида Машук 220 МВ — от 7.48 до 7.78 т/га, среднеспелого гибрида Машук 355 МВ — от 7.61 до 8.61 т/га. В засушливом 2020 г. вследствие недостатка осадков урожайность зерна была значительно меньше и для гибридов составила соответственно 4.50–5.30, 4.38–4.92, 4.50–5.09 т/га. Некорневая подкормка растений кукурузы удобрением Вуксал Макромикс, как и применение минеральных

удобрений, повышала урожайность зерна во все годы, независимо от погодных условий.

Анализ полученных данных за 2018–2020 гг. показал низкую эффективность подкормки растений гибридов кукурузы Машук 220 МВ и Машук 355 МВ удобрением Вуксал Макромикс на фоне допосевного внесения  $N_{aa}$  и НАФК. Рост урожайности зерна при сочетании допосевного внесения НАФК с некорневой подкормкой наблюдали только у раннеспелого гибрида Машук 185 МВ.

Результаты исследования показали высокую эффективность применения удобрения Вуксал Макромикс для некорневой подкормки растений кукурузы. Некорневая подкормка кукурузы в фазе 7–8 листьев в среднем за 2018–2020 гг. существенно повышала урожайность зеленой массы гибридов разных групп спелости на 4.44–6.19 т/га

Таблица 6. Влияние удобрений на число зерен в початке кукурузы, шт.

| Вариант                                 | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. | Средние |          |
|-----------------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                                         |         |         |         | число   | прибавка |
| Гибрид Машук 185 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 396     | 476     | 366     | 413     | —        |
| N30                                     | 443     | 486     | 404     | 444     | 31       |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 404     | 482     | 389     | 425     | 12       |
| N30P30K30                               | 424     | 482     | 399     | 435     | 22       |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 423     | 497     | 403     | 441     | 28       |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 419     | 479     | 379     | 426     | 13       |
| НСП <sub>05</sub> , шт.                 | 35      | 31      | 43      | 18      |          |
| Гибрид Машук 220 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 332     | 405     | 305     | 347     | —        |
| N30                                     | 380     | 420     | 354     | 385     | 38       |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 360     | 455     | 324     | 380     | 33       |
| N30P30K30                               | 376     | 457     | 337     | 390     | 43       |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 372     | 444     | 328     | 381     | 34       |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 365     | 451     | 340     | 385     | 38       |
| НСП <sub>05</sub> , шт.                 | 44      | 39      | 38      | 25      |          |
| Гибрид Машук 355 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 398     | 440     | 298     | 379     | —        |
| N30                                     | 383     | 476     | 326     | 395     | 16       |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 380     | 444     | 330     | 385     | 6        |
| N30P30K30                               | 435     | 484     | 376     | 432     | 53       |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 417     | 464     | 347     | 409     | 30       |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 416     | 465     | 338     | 406     | 27       |
| НСП <sub>05</sub> , шт.                 | 53      | 39      | 61      | 27      |          |

(на 13.3–22.8%), зерна — на 0.48–0.69 т/га (на 8.0–11.5%).

Чтобы выяснить, какие биометрические показатели початка обеспечивали изменения урожайности, провели анализ структуры урожая. Оказалось, что длина початков при применении как минеральных удобрений, так и Вуксал Макромикс, изменялась незначительно. В среднем за 3 года увеличение длины початка гибрида Машук 185 МВ варьировало от 0.1 до 0.2 см, гибридов Машук 220 МВ и Машук 355 МВ — от 0.3 до 0.8 см.

Наибольшее число зерен в початках гибрида Машук 185 МВ выявлено в варианте опыта с внесением аммиачной селитры (444 шт.) и нитроаммофоски с подкормкой (441 шт.). В початках гибрида Машук 220 МВ максимальное число зерен было при применении НАФК (390 шт.) и меньше на 5 шт. в вариантах с внесением N<sub>aa</sub> в почву и

удобрения Вуксал Макромикс в подкормку. В початках гибрида Машук 355 МВ существенное увеличение числа зерен наблюдали при внесении НАФК, подкормке Вуксал Макромикс и их совместном применении (табл. 6).

Некорневая подкормка растений удобрением Вуксал Макромикс без минеральных удобрений существенно увеличивала число зерен в початках гибрида Машук 220 МВ (на 38 шт.) и Машук 355 МВ (на 27 шт.). За счет увеличения числа зерен существенно повышалась масса початков: соответственно на 7.8 и 11.1 г. Сочетание подкормки растений с внесением N<sub>aa</sub> и НАФК не увеличивало достоверно массу початков гибридов кукурузы (табл. 7).

На число зерен и массу початков сильное влияние оказывали погодные условия, особенно количество осадков, выпадавших за июнь и июль.

Таблица 7. Влияние удобрений на массу початка кукурузы, г

| Вариант                                 | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. | Средние |          |
|-----------------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                                         |         |         |         | масса   | прибавка |
| Гибрид Машук 185 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 110     | 139     | 87      | 112     | —        |
| N30                                     | 109     | 144     | 102     | 118     | 7        |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 107     | 142     | 99      | 116     | 5        |
| N30P30K30                               | 105     | 148     | 88      | 114     | 2        |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 113     | 143     | 100     | 119     | 7        |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 115     | 144     | 91      | 116     | 5        |
| НСП <sub>05</sub> , г                   | 11      | 8       | 9       | 6       |          |
| Гибрид Машук 220 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 121     | 139     | 87      | 116     | —        |
| N30                                     | 117     | 146     | 98      | 120     | 5        |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 113     | 146     | 96      | 118     | 2        |
| N30P30K30                               | 128     | 151     | 98      | 126     | 10       |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 123     | 152     | 98      | 124     | 8        |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 129     | 147     | 94      | 124     | 8        |
| НСП <sub>05</sub> , г                   | 13      | 6       | 6       | 6       |          |
| Гибрид Машук 355 МВ                     |         |         |         |         |          |
| Контроль без удобрений                  | 139     | 161     | 122     | 141     | —        |
| N30                                     | 141     | 170     | 126     | 146     | 5        |
| N30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га)       | 150     | 161     | 124     | 145     | 4        |
| N30P30K30                               | 156     | 171     | 121     | 149     | 8        |
| N30P30K30 + Вуксал Макромикс (2.5 л/га) | 139     | 161     | 133     | 145     | 4        |
| Вуксал Макромикс (2.5 л/га)             | 154     | 165     | 137     | 152     | 11       |
| НСП <sub>05</sub> , г                   | 15      | 7       | 12      | 7       |          |

Например, в наиболее благоприятном 2019 г. с суммой осадков за 2 критических месяца 185 мм при применении удобрения Вуксал Макромикс в подкормку в початках гибрида Машук 185 МВ сформировалось 479, гибрида Машук 220 МВ — 451, Машук 355 МВ — 465 зерен. В засушливом 2020 г. при сумме осадков за указанный период 63 мм число зерен в початках этих гибридов составило 379, 340, 338 шт.

Масса початка кукурузы также в сильной степени была подвержена влиянию условий увлажнения в июне и июле. В 2019 г. за счет некорневой подкормки растений удобрением Вуксал Макромикс масса початка гибридов была равна: Машук 185 МВ — 116, Машук 220 МВ — 124, Машук 355 МВ — 152 г., в 2020 г. — значительно меньше: соответственно 90.7, 94.2, 137 г. Несмотря на различия между годами по количеству осадков не-

корневая подкормка растений всегда способствовала увеличению массы початков изученных гибридов кукурузы.

Положительное влияние некорневой подкормки растений на формирование зерен и, как следствие, на массу початков кукурузы проявлялось во все годы исследования независимо от погодных условий.

## ВЫВОДЫ

1. Некорневая подкормка растений удобрением Вуксал Макромикс (2.5 л/га) в среднем за 2018–2020 гг. существенно повысила урожайность зеленой массы гибрида кукурузы Машук 185 МВ на 4.5 т/га (на 14.0%), Машук 220 МВ — на 6.19 т/га (на 22.8%), Машук 355 МВ — на 4.44 т/га (на 13.3%).

2. Некорневая подкормка кукурузы позволила получить существенные прибавки урожая зерна гибрида Машук 185 МВ – 0.48 т/га (8.0%), Машук 220 МВ – 0.60 т/га (11.0%), Машук 355 МВ – 0.69 т/га (11.5%). Рост урожая зерна при некорневой подкормке был обусловлен формированием большего числа зерен в початках гибридов на 13–38 шт., а также увеличением массы початков на 4.7–11.1 г.

3. При подкормке растений изученных гибридов кукурузы удобрением Вуксал Макромикс на фоне внесения N30 и N30P30K30 прибавки урожая зеленой массы увеличились по сравнению с применением одних минеральных удобрений не существенно. Подкормка растений удобрением Вуксал Макромикс обеспечивала существенный рост прибавки урожая зерна на фоне допосевого внесения НАФК только у раннеспелого гибрида Машук 185 МВ.

4. Полученные данные дают основание на типичных черноземах Ставропольского края рекомендовать некорневую подкормку удобрением Вуксал Макромикс для гибридов кукурузы Машук 220 МВ и Машук 355 МВ как самостоятельный агроприем. Для гибрида Машук 185 МВ некорневая подкормка удобрением Вуксал Макромикс эффективна на фоне внесения N30P30K30.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев В.В., Чернов А.П., Куйдан А.П. Особенности питания и удобрение сельскохозяйственных культур на Юге России. Ставрополь: ГСХА, 1999. 113 с.
2. Ермоленко В.П. Научные основы земледелия Дона. М.: ИК "Родник", 1999. 176 с.
3. Мелихов В.В., Кружилин И.П., Кузнецова И.П. Руководство по возделыванию кукурузы на зерно / Под ред. Мелихова В.В. Волгоград: ГУ "Издатель", 2003. 88 с.
4. Стулин А.Ф. Влияние видов удобрений на урожайность кукурузы в условиях Воронежской области // Кукуруза и сорго. 2012. № 1. С. 19–24.
5. Sharifi R.S., Taghizadeh R. Response of maize (*Zea mays* L.) cultivars to different levels of nitrogen fertilizer // J. Food Agric. Environ. 2009. V. 7. № 3–4. P. 518–521.
6. Сычев В.Г. Перспективы использования новых агрохимикатов в современных агротехнологиях // Перспективы использования инновационных форм удобрений, средств защиты и регуляторов роста растений в агротехнологиях сельскохозяйственных культур: Мат-лы докл. участников 10-й научн.-практ. конф. "Анапа-2018" / Под ред. Сычева В.Г. М.: ООО "Плодородие", 2018. С. 3–6.
7. Ломовский Д.В. Продуктивность кукурузы в зависимости от обработки семян протравителями, микроудобрениями и прикорневой подкормки макроудобрениями на выщелоченном черноземе Западного Предкавказья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Краснодар, 2007. 24 с.
8. Багринцева В.Н., Ивашенко И.Н., Каримов Г.Ю., Шарафутдинов М.Х. Эффективность применения удобрений Батр 40 Азот и Батр Макс на кукурузе // Кукуруза и сорго. 2019. № 2. С. 9–13.
9. Адаев Н.Л., Хамзатова М.Х., Амаева А.Г. Интенсификация системы удобрения кукурузы в условиях орошения в Чеченской Республике // Кукуруза и сорго. 2019. № 2. С. 14–21.
10. Таран Д.А. Продуктивность гибридов кукурузы в зависимости от припосевого внесения и подкормки азотом и гуматом калия на черноземе выщелоченном Западного Предкавказья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Краснодар, 2013. 24 с.
11. Новичихин А.М., Мухина С.В., Сыромятов В.Ю. Взаимодействие агрохимических средств и урожайность озимых тритикале и ржи // Развитие и внедрение современных технологий и систем ведения сельского хозяйства, обеспечивающих экологическую безопасность окружающей среды. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 100-летию Пермского НИИСХ, 3–5 июля 2013 г. Пермь. Т. 1. Агрохимия и земледелие. Ч. 2. Пермь: ОТ и ДО. Пермь, 2013. С. 110–117.
12. Новичихин А.М., Мухина С.В., Юрьева Н.И., Гончаров Г.В. Применение агрохимических средств и их взаимодействие на урожайность различных сортов озимой пшеницы // Там же. С. 118–125.
13. Климашевский Э.Л. Генетический аспект минерального питания растений. М.: Агропромиздат, 1991. 415 с.
14. Dobermann A. Procedure for measuring dry matter, nutrient uptake, yield and components of yield in maize. Vers. 1.1. University of Nebraska–Lincoln, 2005. 12 p.
15. Шелганов И.И., Воронин А.Н. Особенности минерального питания кукурузы // Кукуруза и сорго. 2008. № 4. С. 10–11.
16. Багринцева В.Н., Ивашенко И.Н. Эффективность азотного удобрения на гибридах кукурузы в зоне достаточного увлажнения Ставропольского края // Агрохимия. 2018. № 1. С. 72–76.
17. Багринцева В.Н., Ивашенко И.Н., Никитин С.В., Черкасова М.А. Сравнение эффектов от разных удобрений на гибридах кукурузы (*Zea mays* L.) в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края // Пробл. агрохим. и экол. 2019. № 3. С. 15–19.
18. Багринцева В.Н., Ивашенко И.Н. Отзывчивость гибридов кукурузы (*Zea mays* L.) на некорневые подкормки агрохимикатами // Пробл. агрохим. и экол. 2020. № 3. С. 15–20.
19. Подколзин А.И. Эволюция, воспроизводство плодородия почв и оптимизация применения удобрений в агроландшафтах Центрального Предкавказья: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2008. 45 с.

## Efficiency of Application of Agrochemical Vuksal Macromix for Foliar Feeding of Corn

V. N. Bagrintseva<sup>a, #</sup> and I. A. Shmalko<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *All-Russian Research Scientific Institute of Corn  
ul. Ermolova 14-b, Pyatigorsk 357528, Russia*

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

In the Stavropol region, on typical black soils in 2018–2020, the effectiveness of foliar feeding of corn plants in the phase of 7–8 leaves with the fertilizer Vuksal Macromix (2.5 l/ha) was studied against the background of mineral fertilizers N30 and N30P30K30, and also without them. Foliar feeding with mineral fertilizer Vuksal Macromix (2.5 l/ha) increased on average for 2018–2020 the yield of green mass of an early-ripening corn hybrid Mashuk 185 MV by 4.5 t/ha (14.0%), a mid-early Mashuk 220 MV – by 6.19 t/ha (22.8%), a mid-ripening Mashuk 355 MV – by 4.44 t/ha (13.3%). Increases were obtained in the grain yield of the hybrid Mashuk 185 MV – 0.48 t/ha (8.0%), Mashuk 220 MV – 0.60 t/ha (11.0%), Mashuk 355 MV – 0.69 t/ha (11.5%). Foliar feeding of plants with the fertilizer Vuksal Macromix without mineral fertilizers increased grains amount on the cob, on average over three years for the hybrid Mashuk 185 MV it increased by 13, Mashuk 220 MV – by 38, Mashuk 355 MV – 27 kernels. Due to the increase in the number of grains, the weight of the ears increased correspondingly to hybrids by 4.7, 7.8, 11.1 g. When feeding plants against the background of the introduction of ammonium nitrate into the soil at a dose of N30, the increase in the yield of green mass in comparison with the use of nitrogen alone in different corn hybrids was by 0.78–1.38 t/ha. At the same time, against the background of the introduction of N<sub>aa</sub> into the soil, fertilizing corn plants with an agrochemical did not provide an increase in grain yield increments in comparison with the use of nitrogen fertilizer. The dependence of the effectiveness of foliar feeding of plants with the fertilizer Vuksal Makromix against the background of nitroammophoska at a dose of N30P30K30 on the biological characteristics of corn hybrids was revealed. Significant an increase in the yield of grain by 0.42 t/ha was observed only in the early ripening hybrid Mashuk 185 MV.

*Key words:* corn, Vuksal Macromix fertilizer, foliar top dressing, yield, green mass, grain.



УДК 574.4:631.41:553.31(470.323)

## АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

© 2021 г. А. И. Стифеев<sup>1</sup>, О. В. Никитина<sup>1,\*</sup>, В. И. Лазарев<sup>2</sup>, Р. А. Зиновьев<sup>1</sup><sup>1</sup> Курская государственная сельскохозяйственная академия им. И.И. Иванова

305021 Курск, ул. Карла Маркса, 70, Россия

<sup>2</sup> Курский федеральный аграрный научный центр

305021 Курск, ул. Карла Маркса, 70б, Россия

\*E-mail: Nikioxana2009@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.10.2020 г.

После доработки 11.01.2021 г.

Принята к публикации 10.04.2021 г.

Наибольшее воздействие на окружающую природную среду оказывают горнодобывающие комплексы. С начала 1960-х гг. в центре России функционируют 3 горнодобывающих комбината (ГОК): Михайловский, Старооскольский и Лебединский, где добыча железной руды осуществляется открытым способом. При этом изымаются из землепользования ценнейшие плодородные почвы – черноземы. В настоящее время нарушено 36 тыс. га и продолжается тенденция к их увеличению. В результате взрывов железной руды, создания отвалов горных пород, хвостохранилищ происходит загрязнение прилегающих к ним почв на расстоянии до 20 км от их местонахождения. Приведены данные агрохимических свойств почв и содержание в них тяжелых металлов (ТМ) в условиях функционирования Михайловского ГОКа, установлено превышение ПДК ТМ в почвах. Накопление в почвах ТМ уменьшило количество полезной микрофлоры (*Azotobacter*, *Rhizobium*, *Clostridium*), снизило биологическую активность целлюлозоразрушающих микроорганизмов и ферментативную активность каталазы в 1.7 раза. Определена урожайность озимой пшеницы и ярового ячменя в производственных посевах ООО “Горняк”, ООО “Восход” и ООО “Возрождение”, расположенных на разном расстоянии от источников загрязнения: соответственно 20, 5 и 0.5 км. Установлено снижение урожайности пшеницы и ячменя на 8.2–7.2 ц/га в сравнении с контролем (20 км). Содержание ТМ в зерне ячменя отмечено в зоне активного загрязнения (5 км), где наблюдается превышение ПДК Cd в 4.5 раза (ячмень) и 7 раз (пшеница). Предложены меры по снижению загрязнения серых лесных почв при добыче железной руды в условиях МГОКа КМА.

**Ключевые слова:** Курская магнитная аномалия, отвалы, хвостохранилище, техногенный ландшафт, тяжелые металлы, микроорганизмы, урожайность, почвы.

**DOI:** 10.31857/S0002188121070103

### ВВЕДЕНИЕ

В начале XXI столетия антропогенная деятельность стала ведущим по значимости и масштабам экологическим фактором. Развитие промышленного и сельскохозяйственного производства приводит к нарушению природных циклов миграции элементов. Вещества, используемые в промышленности, чаще всего относятся к металлам, в результате чего отмечена “металлизация” ландшафтов. Значительные проявления этих процессов наблюдают на территориях добычи и переработки минерального сырья. К таким регионам следует отнести территорию Курской магнитной аномалии (КМА), где добыча и обогащение железной руды осуществляется 3-мя круп-

нейшими горно-обогатительными комбинатами (ГОК): Михайловским, Лебединским и Стойленским. Технология добычи железной руды производится открытым способом. В результате этого в почвенном покрове, прилегающем к карьерам, отвалам и хвостохранилищам снижается плодородие в результате поступления в почву пылевых выбросов, содержащих тяжелые металлы (ТМ).

В настоящее время под карьеры, отвалы и хвостохранилища из землепользования 2-х областей изъято свыше 36 тыс. га ценнейших черноземов и серых лесных почв [1]. В результате открытого способа добычи железной руды из карьеров извлечено более 2 млрд м<sup>3</sup> горных пород различного геологического возраста и состава. Горно-обогат-

тельными комбинатами отсыпано  $\approx 1$  млрд  $\text{м}^3$  отходов обогащения. В результате на смену естественным ландшафтам приходят техногенные, которые оказывают влияние на загрязнение почвы, атмосферного воздуха и поверхностных водоемов [2]. Исследованиями [3] установлено, что предприятия по добыче железной руды влияют на почву до 30 км от источников выбросов загрязнителей, при этом [4] отмечено, что в окружающую среду поступает 55 химических элементов, 9 из них относятся к веществам 1-го и 2-го класса опасности.

Такое состояние при добыче железной руды на КМА требует создания экологически устойчивого техногенного ландшафта, позволяющего решать практические вопросы по преобразованию техногенных ландшафтов, снижению негативного влияния на окружающую среду, повышению продуктивности загрязненного почвенного покрова.

Цель работы — изучение техногенного воздействия на почвы и продуктивность агроценозов на территории прилегающей к Михайловскому ГОКу КМА.

В задачи исследования входило:

- определение агрохимических свойств почв и валового содержания ТМ, поступающих в почву из техногенных ландшафтов Михайловского железорудного месторождения КМА;
- определение биологической и ферментативной активности микроорганизмов в почве в зависимости от поступления ТМ;
- закладка производственного опыта по определению влияния ТМ на урожайность и качество зерна озимой пшеницы и ярового ячменя.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование по определению влияния Михайловского ГОКа на состояние почвенного покрова и продуктивность агроценозов проводили в 2017–2019 гг. Карьер МГОКа занимает площадь свыше 2500 га, глубина карьера превышает 350 м. Добыча железной руды осуществляется путем взрывов, в результате чего в атмосферный воздух поступают пылевые выбросы различного химического состава. Вблизи карьера отсыпано в отвалы свыше 1 млрд  $\text{м}^3$  горных пород, которые занимают площадь  $\approx 5$  тыс. га. С их поверхности в результате дефляции происходит загрязнение атмосферного воздуха.

Хвостохранилище обогатительной фабрики МГОКа — одно из крупнейших в России, площадь земельного отвода составляет 2500 га. Хво-

стоохранилище намывного типа, 2-го класса опасности представляет собой естественную емкость, образованную плотиной в русле реки Песочной и ограниченную дамбами из кварцитов. С пляжных подсушенных поверхностей в результате дефляции переносятся отходы обогащения до 200 т/га в течение года.

Почвенные образцы отбирали в зоне влияния пылевых выбросов из карьера, хвостохранилища и отвалов Михайловского горно-обогатительного комбината. Определение агрохимических свойств серых лесных почв в ООО “Горняк”, ООО “Восход” и ООО “Возрождение” проводили в зависимости от расстояния 20, 5 и 0.5 км от источников загрязнения согласно розе ветров. Отбор проб осуществляли в слоях 0–10, 10–20, 20–30 и 30–40 см почвы, повторность трехкратная. Агрохимические свойства почв определяли согласно руководству по химическому анализу почв [5].

Определение содержания ТМ в почвах проводили согласно методическим рекомендациям по обследованию и картографированию почвенного покрова по уровням загрязненности промышленными выбросами. Схема отбора образцов включала отбор образцов почвы на расстоянии 0.5, 1, 3, 5, 7, 9, 12, 15 и 20 км от источников их поступления. Глубина отбора — слой 0–20 см. Все почвенные образцы отбирали почвенным тростевым буром ВП-25-15 по диагонали агроценозов.

Схема производственного опыта с посевом озимой пшеницы (сорт Московская-56) и ярового ячменя (сорт Скакун) включала: посев данных культур в хозяйстве ООО “Горняк” на расстоянии 20 км от источников загрязнения, в хозяйстве ООО “Восход” на расстоянии 5 км от источников загрязнения и в хозяйстве ООО “Возрождение” на расстоянии 0.5 км от источника загрязнения. Почвы имели одинаковые агрохимические свойства (содержание гумуса в слое 0–10 см составило 3.2%; подвижного фосфора — 99, обменного калия — 113 мг/кг, pH 5.4). Посевная площадь под озимой пшеницей составляла 50 га, под яровым ячменем — 30 га. Посев проводили в оптимальные сроки: озимую пшеницу сеяли 4 сентября 2018 г., яровой ячмень — 28 апреля 2019 г. Норма высева составила 220 кг/га (озимая пшеница) и 250 кг/га (ячмень). Уборку культур проводили по мере созревания соответственно 20 и 25 июля комбайном ДОН-500. Учет урожая на каждом поле определяли на площади 200  $\text{м}^2$ , в трехкратной повторности, затем пересчитывали урожай в расчете на 1 га.

Статистическую обработку урожайных данных проводили с помощью пакетов программ статистического анализа STATGRAPHICS Plus.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольшее распространение в зоне функционирования карьера, отвалов и хвостохранилища имели серые лесные почвы, характеризующиеся наличием в почвопоглощающем комплексе обменных катионов водорода и кислой реакцией среды. Анализ физических свойств почв показал, что плотность сложения верхнего гумусового горизонта в среднем составляла 1.22 г/см<sup>3</sup>, плотность твердой фазы менялась от 2.60 до 2.66 г/см<sup>3</sup>, гранулометрический состав — тяжелосуглинистый. Результаты агрохимических свойств серых лесных почв Железнодорожного р-на приведены в табл. 1.

Результаты определения агрохимических свойств почв свидетельствовали о том, что в верхнем (0–10 см) слое содержание гумуса составляло 3.2%, с глубиной (30–40 см) его содержание уменьшалось до 0.9%. Реакция среды была слабокислой — pH 5.4. Гидролитическая кислотность в верхнем слое менялась от 4.7 (слой 0–10 см) до 4.0 мг-экв/100 г почвы (слой 30–40 см). Сумма обменных оснований была невысокой и соответственно составляла от 22.1 до 18.0 мг-экв/100 г почвы. Содержание подвижных элементов питания в верхнем слое составляло: азота — 75, фосфора — 99 и калия — 113 мг/кг. В целом для получения высокого (прогнозируемого) урожая сельскохозяйственных культур требовалось внесение минеральных удобрений.

В табл. 2 приведены данные содержания валовых форм ТМ в почве в зависимости от источников их поступления. Показано, что поступление пылевых выбросов из карьера, отвалов и хвостохранилища приводило к увеличению содержания в почве ТМ. Наибольшее их содержание отмечено на расстоянии от источника выбросов 5–9 км. На расстоянии 12 и более километров содержание кадмия не превышало ПДК. Отмечено снижение содержания валового кадмия с расстояния 12 км. Содержание кобальта в валовой форме превысило ПДК на расстоянии 0.5 км (в 1.4 раза) и снизилось на расстоянии до 12 км (до 1.1 раза). Максимальное количество кобальта отмечено на расстоянии от источника загрязнения 5 км, где ПДК была превышена в 3.7 раза. Содержание меди превышало ПДК на расстоянии 5 и 7 км и составило соответственно 1.7 и 1.2 ПДК. Наибольшее загрязнение почв было валовым железом. Превышение фонового содержания железа в валовой форме отмечено в образцах почв, взятых на расстоянии от 0.5 км, где превышение фона составило 5.9 раза, максимальное содержание отмечено

**Таблица 1.** Агрохимические свойства серых лесных почв Железнодорожного р-на Курской обл. (средние)

| Показатель                                      | Горизонт, см |       |       |       |
|-------------------------------------------------|--------------|-------|-------|-------|
|                                                 | 0–10         | 10–20 | 20–30 | 30–40 |
| Гумус, %                                        | 3.2          | 2.7   | 1.1   | 0.9   |
| pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>                    | 5.4          | 5.4   | 5.5   | 5.6   |
| H <sub>+</sub> , мг-экв/100 г почвы             | 4.7          | 4.5   | 4.2   | 4.0   |
| Сумма поглощенных оснований, мг-экв/100 г почвы | 22.1         | 22.0  | 19.2  | 18.0  |
| Гидролизующий азот по Тюриной—Кононовой, мг/кг  | 75.0         | 67.0  | 52.0  | 39.0  |
| Подвижный фосфор по Чирикову, мг/кг             | 99.0         | 100   | 98.8  | 90.0  |
| Обменный калий по Масловой, мг/кг               | 113          | 114   | 114   | 114   |

**Таблица 2.** Содержание валовых форм тяжелых металлов в почве в зависимости от источников их поступления (слой 0–20 см почвы), мг/кг

| Расстояние от источника загрязнения, км | Содержание ТМ |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|
|                                         | Cd            | Cu   | Zn   | Mn   | Pb   | Fe   | Co   |
| 0.5                                     | 8.4           | 19.8 | 6.7  | 33.2 | 6.1  | 1930 | 17.2 |
| 1                                       | 12.3          | 47.8 | 10.1 | 30.1 | 8.2  | 823  | 34.0 |
| 3                                       | 19.6          | 51.7 | 21.1 | 32.4 | 18.4 | 8680 | 38.8 |
| 5                                       | 22.3          | 85.8 | 43.1 | 47.2 | 27.2 | 9850 | 44.8 |
| 7                                       | 10.4          | 58.8 | 33.5 | 36.0 | 22.1 | 8350 | 37.2 |
| 9                                       | 3.8           | 48.9 | 26.7 | 34.6 | 19.3 | 7030 | 31.2 |
| 12                                      | 2.5           | 47.3 | 25.3 | 32.1 | 14.7 | 4390 | 13.6 |
| 15                                      | 1.8           | 20.3 | 17.0 | 30.8 | 6.1  | 2390 | 11.6 |
| 20                                      | 0.9           | 18.7 | 11.9 | 30.0 | 5.7  | 1310 | 6.0  |
| ПДК (ЦИНАО, 1991) (фон)                 | 3.0           | 55.0 | 100  | 1500 | 32.0 | 330  | 12.0 |

на расстоянии 5 км (в 29 раз), и загрязнение уменьшалось на расстоянии 20 км до 3.9 раза.

Таким образом, основными загрязнителями серых лесных почв в пахотном горизонте (0–20 см) были следующие элементы: Cd, Cu, Co и Fe.

Почва является единственной природной средой, где для развития полезной микрофлоры существуют необходимые условия [10–12]. В 1 г серых лесных почв содержится >500 млн бактерий, масса которых достигает 1 т/га. Основные виды полезной микрофлоры представлены родами *Azotobacter* — индикаторами плодородия, *Rhizobium* — азотфиксаторами, *Clostridium* — свободноживу-

**Таблица 3.** Количество полезной микрофлоры в серой лесной почве в зависимости от содержания в ней ТМ (тыс. шт./г почвы)

| Род микрофлоры     | Глубина отбора образца, см | Расстояние от источника загрязнения, км |      |      |
|--------------------|----------------------------|-----------------------------------------|------|------|
|                    |                            | 0.5                                     | 5    | 20   |
| <i>Azotobacter</i> | 0–15                       | 5.2                                     | 19.5 | 28.1 |
| <i>Rizobium</i>    | 0–15                       | 6.3                                     | 10.9 | 19.0 |
| <i>Clostridium</i> | 0–15                       | 5.8                                     | 13.8 | 22.4 |

**Таблица 4.** Целлюлозоразрушающая активность микроорганизмов в зависимости от загрязнения почв тяжелыми металлами

| Расстояние от источника загрязнения, км | Убыль ткани через 40 сут экспозиции, % |      |      |         |                        |
|-----------------------------------------|----------------------------------------|------|------|---------|------------------------|
|                                         | повторность                            |      |      | среднее | отклонение от контроля |
|                                         | 1                                      | 2    | 3    |         |                        |
| 0.5                                     | 16.4                                   | 17.6 | 18.0 | 17.3    | 14.9                   |
| 5                                       | 12.2                                   | 13.0 | 13.9 | 13.1    | 9.1                    |
| 20 (контроль)                           | 30.4                                   | 32.0 | 34.2 | 32.2    | 0                      |
| <i>HCP</i> <sub>05</sub>                | 4.1                                    |      |      |         |                        |

щими азотфиксаторами. Накопление в почве ТМ в условиях кислой среды (рН 5.4) значительно повлияло на полезную микрофлору (табл. 3). Показано, что в зоне активного загрязнения почв ТМ количество полезной микрофлоры было минимальным и составляло 5.2 тыс. шт./г почвы (*Azotobacter*), 6.3 тыс. шт./г почвы (*Rhizobium*) и 5.8 тыс. шт./г почвы (*Clostridium*). По мере удаления от источников загрязнения их количество увеличивалось и в контроле составило 28.1, 19.0 и 22.4 тыс. шт./г почвы соответственно [12].

В составе органических веществ растительно-го происхождения находится большая группа микроорганизмов, разрушающих целлюлозу (клетчатку). От количества этих микроорганизмов и условий окружающей среды зависит активность и скорость разложения клетчатки. В исследовании [12] установлено, что загрязнение почв антропогенными выбросами привело к резкому снижению биологической активности. Результаты исследования активности целлюлозоразрушающих микроорганизмов в почве под посевами озимой пшеницы после ее уборки приведены в табл. 4. Согласно приведенным данным, отмечено значительное влияние ТМ на разложение клетчатки. В контроле была выявлена высокая активность целлюлозоразрушающих микроорганизмов, что составило 32.2%. В зависимости от величины загрязнения почв ТМ, активность микроорганизмов составила 17.3 (0.5 км) и 13.1% (5 км). Соответственно активность микроорганизмов уменьшилась на 14.9 и 9.1% по сравнению

с контролем. Таким образом, активность микроорганизмов в почве во многом зависела от местонахождения источников поступления ТМ.

Большой интерес представляла взаимосвязь между активностью почвы и формированием симбиотического аппарата. Ферментативная активность тесно связана с кислотностью почв, содержанием в ней биофильных элементов и концентрацией ТМ [13, 14].

Наиболее широко изучена каталаза, которая разлагает в почве ядовитый для клеток пероксид водорода, образующийся в процессе дыхания живых организмов. Каталаза является не только внутриклеточным ферментом, она активно выделяется микроорганизмами в окружающую среду, обладает высокой устойчивостью, может накапливаться и длительно храниться в почве. Результаты проведенных анализов позволили судить о том, что на ферментативную активность почвы значительное влияние оказало загрязнение почв ТМ в результате их аккумуляции (табл. 5). Показано, что на расстоянии 20 км при наименьшем загрязнении почв ТМ отмечали наибольшую ферментативную активность каталазы, которая составила 4.3 см<sup>3</sup> О<sub>2</sub>/г/мин, по мере загрязнения почв ТМ активность каталазы снижалась на 0.7 (0.5 км) и 1.7 см<sup>3</sup> О<sub>2</sub>/г/мин (5 км). Таким образом, загрязнение почв ТМ приводило к снижению ферментативной активности почвы.

Исследования ряда ученых [15–18] свидетельствовали о влиянии ТМ на рост, развитие и про-

**Таблица 5.** Ферментативная активность каталазы в зависимости от поступления в почву ТМ, см<sup>3</sup> О<sub>2</sub> г/мин

| Расстояние от источника загрязнения, км | Повторность |     |     | Среднее | Отклонение от среднего |
|-----------------------------------------|-------------|-----|-----|---------|------------------------|
|                                         | 1           | 2   | 3   |         |                        |
| 0.5                                     | 3.1         | 3.8 | 4.0 | 3.6     | –0.7                   |
| 5                                       | 2.0         | 2.9 | 3.0 | 2.6     | –1.7                   |
| 20 (контроль)                           | 3.9         | 4.2 | 5.0 | 4.3     | 0                      |
| <i>HCP</i> <sub>05</sub>                | 0.9         |     |     |         |                        |

дуктивность сельскохозяйственных культур. Представляло интерес изучить влияние уровня загрязнения почв ТМ в зависимости от расстояния от источника их поступления на урожайность озимой пшеницы и ярового ячменя (табл. 6). Приведенные данные свидетельствовали о том, что наибольший урожай был получен в агроценозах, расположенных на расстоянии 20 км от источников загрязнения и составил 34.8 ц/га (пшеница) и 24.6 ц/га (ячмень).

В непосредственной близости к источникам загрязнения (0.5 км) урожайность пшеницы снизилась на 3.6, ячменя — на 3.3 ц/га. Как отмечено выше, в этом случае уровень поступления в почву ТМ был максимальным, и их содержание в почве превышало ПДК в несколько раз, что значительно повлияло на снижение урожайности культур. Для озимой пшеницы урожайность уменьшилась на 8.2 ц/га, ярового ячменя — на 7.2 ц/га. Таким образом, накопление в почве ТМ в валовой форме приводило к значительному снижению урожайности зерновых культур.

Было также изучено поступление ТМ в зерно озимой пшеницы и ярового ячменя. Растения являются чувствительными индикаторами состояния экологической среды.

**Таблица 6.** Урожайность озимой пшеницы и ярового ячменя в зависимости от уровня загрязнения почв ТМ, ц/га

| Расстояние от источника загрязнения, км | Делянка |      |      | Среднее | Отклонение от среднего |
|-----------------------------------------|---------|------|------|---------|------------------------|
|                                         | 1-я     | 2-я  | 3-я  |         |                        |
| 20 км (контроль)                        | 33.5    | 34.8 | 36.2 | 34.8    | —                      |
|                                         | 23.0    | 24.2 | 26.1 | 24.6    |                        |
| 5 км                                    | 26.0    | 26.9 | 27.0 | 26.6    | –8.2                   |
|                                         | 16.1    | 17.3 | 18.9 | 17.4    | –7.2                   |
| 0.5 км                                  | 29.6    | 31.0 | 33.2 | 31.2    | –3.6                   |
|                                         | 23.0    | 24.9 | 26.0 | 21.3    | –3.3                   |
| <i>HCP</i> <sub>05</sub>                | 3.8     |      |      | 3.9     |                        |

Примечание. Над чертой — озимая пшеница, под чертой — яровой ячмень. То же в табл. 7.

гической среды. Как отмечено в [18], наличие техногенных источников загрязнения почв способствует поступлению ТМ в растения, которые накапливаются не только из почвы, но и из воздуха. Существует 2 основных пути поступления ТМ в растения: корневой и фоллиарный (через листья). Было изучено содержание ТМ в зерне возделываемых культур (табл. 7). Анализ данных свидетельствовал о том, что содержание в зерне пшеницы и ячменя Mn, Pb, Co, Fe не превышало ПДК. Установлено превышение в зерновой продукции пшеницы содержания Cd на расстоянии 0.5 км в 5 раз, 5 км — в 7 раз, ячменя соответственно в 2.0 и 4.5 раза. Кроме того, в зерне ячменя отмечено незначительное превышение содержания Cu и Zn. Таким образом, техногенное воздействие карьера, отвалов горных пород и хвостохранилища приводило к загрязнению ТМ не только почв, но и урожая зерновых культур.

## ВЫВОДЫ

1. Добыча железной руды на территории КМА приводит к значительному экологическому воздействию на окружающую среду. Пылевые выбросы (поступление) из карьеров, с поверхности отвалов и хвостохранилищ загрязняют почвы, что снижает продуктивность и качество продукции агроценозов.

**Таблица 7.** Содержание ТМ в зерне озимой пшеницы и ярового ячменя (2019 г.)

| Расстояние от источника загрязнения, км | Содержание ТМ, мг/кг |      |      |     |     |      |     |
|-----------------------------------------|----------------------|------|------|-----|-----|------|-----|
|                                         | Cd                   | Cu   | Zn   | Mn  | Pb  | Fe   | Co  |
| 20 (контроль)                           | 0.02                 | 1.35 | 10.8 | 110 | 2.2 | 14.4 | 1.1 |
|                                         | 0.02                 | 3.41 | 21.4 | 117 | 2.0 | 32.1 | 0.8 |
| 5                                       | 0.14                 | 1.89 | 12.4 | 119 | 2.6 | 19.2 | 2.8 |
|                                         | 0.09                 | 5.78 | 28.9 | 141 | 2.8 | 37.0 | 1.1 |
| 0.5                                     | 0.11                 | 1.27 | 10.5 | 99  | 2.0 | 14.4 | 1.3 |
|                                         | 0.05                 | 2.86 | 25.0 | 101 | 2.3 | 27.9 | 0.9 |
| ПДК                                     | 0.02                 | 5    | 25   | 150 | 3.2 | 50   | 10  |

2. Анализ агрохимических показателей пахотных земель показал, что в почву поступают тяжелые металлы (ТМ): Cd, Cu, Zn, Mn, Pb, Fe, Co, содержание отдельных из них в 5-км зоне от источников их поступления превышало ПДК. Для Cd отмечено превышение в 7 раз, Co — в 1.4 раза, Fe — в 29 раз.

3. ТМ оказывают неблагоприятное воздействие на биологическую активность полезной микрофлоры. Количество азотфиксирующих микроорганизмов в 5-км зоне снижалось: *Rizobium* — в 3 раза, *Azotobacter* — в 5 раз, *Clostridium* — в 4 раза, ферментативная активность каталазы уменьшилась в 1.8 раза.

4. Продуктивность озимой пшеницы и ярового ячменя в 5-км зоне от источников загрязнения снижалась соответственно на 8.2 и 7.2 ц/га, при этом отмечено поступление в зерно Cd, Cu и Zn.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стифеев А.И., Бессонова Е.А. Биологическая рекультивация нарушенных земель Центрального Черноземья — основной путь создания устойчивых техногенных ландшафтов Курской магнитной аномалии // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель: Мат-лы Междунаро. научн. конф. Екатеринбург, 4–8 июня, 2007 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. С. 558–596.
2. Стифеев А.И., Никитина О.В., Бессонова Е.А., Кемов К.Н. Рекультивация нарушенных земель и технология их реабилитации на территории ЦЧ // Междунаро. сел.-хоз. журн. 2017. № 6. С. 34–38.
3. Афанасьева Г.Е. Установление ареалов воздействия горных пород на окружающую среду // Экология, окружающая среда и здоровье населения Центрального Черноземья: Мат-лы Междунаро. научн.-практ. конф. Ч. 2. Курск: КГМУ, 2005. С. 5–7.
4. Харламова Е.Н., Заломихин А.В. Проблемы экологии города Старый Оскол // Экология, окружающая среда и здоровье населения Центрального Черноземья: Мат-лы Междунаро. научн. конф. Ч. 2. Курск: КГМУ, 2005. С. 174–176.
5. Ариунушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1961. 312 с.
6. Важенкин И.Г. Методические рекомендации по обоснованию и картографированию почвенного покрова по уровням загрязненности промышленными выбросами М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1987. 25 с.
7. Теплер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. М.: Колос, 1993. 175 с.
8. Звягинцев Д.Г., Асеев И.В., Бабьева И.П. Методы почвенной микробиологии. М.: Изд-во МГУ, 1980. 224 с.
9. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 351 с.
10. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования Л.: Наука, 1980. 187 с.
11. Мишустин Е.Н., Шильникова В.К. Биологическая фиксация атмосферного азота. М.: Колос, 1968. 532 с.
12. Стифеев А.И., Лазарев В.И., Никитина О.В. Роль микроорганизмов в круговороте веществ и почвенном плодородии Центрального Черноземья // Вестн. КурскГСХА. 2019. № 9. С. 22–29.
13. Щербакова Т.А. Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества. Минск, 1983. 220 с.
14. Ильин В.Б., Гармаш Г.А., Гармаш Н.Ю. Влияние тяжелых металлов на рост, развитие и урожайность сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 1985. № 6. С. 90–100.
15. Стифеев А.И., Бессонова Е.А., Кемов К.Н., Никитина О.В. Оценка и нормирование экологического состояния почв в зоне функционирования Михайловского железорудного комбината КМА // Вестн. КурскГСХА. 2015. № 4. С. 54–57.
16. Стифеев А.И., Бабенко О.В. Содержание тяжелых металлов в почвах и растениях пригородной зоны // Вестн. РАСХН. 2008. № 3. С. 36–38.
17. Фильчаков Ю.В., Стифеев А.И. Влияние хвостохранилища Михайловского ГОКа КМА на почвенный и растительный покров // Аграр. наука. 2007. № 9. С. 8–10.
18. Шиханов Н.С., Юлушев И.Г. О фоновом содержании некоторых микроэлементов в растениях на территории Кировской области // Рациональное использование и охрана лугов Урала. Пермь, 1984. С. 127–131.

### Agroecological State of the Soil Cover on the Territory of Iron Ore Deposits of the Kursk magnetic anomaly

A. I. Stifeev<sup>a</sup>, O. V. Nikitin<sup>a, #</sup>, V. I. Lazarev<sup>b</sup>, and R. A. Zinoviev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> I.I. Ivanov Kursk State Agricultural Academy ul. Karla Marxa 70, Kursk 305021, Russia

<sup>b</sup> Kursk Federal Agricultural Research Center ul. Karla Marxa 70b, Kursk 305021, Russia

<sup>#</sup>E-mail: Nikioxana2009@yandex.ru

Mining complexes have the greatest impact on the natural environment. Since the early 1960s, there have been 3 mining plants (GOK) operating in the center of Russia: Mikhailovsky, Starooskolsky and Lebedinsky, where iron ore is extracted by open-pit mining. At the same time, the most valuable fertile soils —

chernozems – are withdrawn from land use. Currently, 36 thousand hectares have been disturbed and the trend towards their increase continues. As a result of iron ore explosions, the creation of rock dumps, and tailings dumps, the adjacent soils are polluted at a distance of up to 20 km from their location. The data on the agrochemical properties of soils and the content of heavy metals (HM) in them under the conditions of operation of the Mikhailovsky GOK are presented, and the excess of the MPC of HM in soils is established. The accumulation of HM in soils reduced the amount of useful microflora (*Azotobacter*, *Rhizobium*, *Clostridium*), reduced the biological activity of cellulose-destroying microorganisms and the enzymatic activity of potassium by 1.7 times. The yield of winter wheat and spring barley in the production crops of LLC “Gornyak”, LLC “Voskhod” and LLC “Vozrozhdenie” located at different distances from the sources of pollution was determined: 20, 5 and 0.5 km respectively. A decrease in the yield of wheat and barley by 8.2–7.2 c/ha was found in comparison with the control (20 km). The content of HM in barley grain was observed in the zone of active contamination (5 km), where the maximum permissible concentration of Cd is 4.5 times higher (barley) and 7 times higher (wheat). Measures are proposed to reduce the pollution of gray forest soils during iron ore mining in the conditions of the MGOK Kursk magnetic anomaly.

*Key words:* Kursk magnetic anomaly, dumps, tailings storage, technogenic landscape, heavy metals, microorganisms, yield, soils.

УДК 631.467.468:631.417

## БИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЕДОБИОНТОВ В ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПОЧВ

© 2021 г. П. Г. Витион

*Институт генетики, физиологии и защиты растений  
MD-2002 Кишинэу, ул. Пэдурий, 20, Республика Молдова*

*E-mail: vitionpantelei@yahoo.com*

Поступила в редакцию 02.02.2020 г.

После доработки 01.03.2021 г.

Принята к публикации 10.03.2021 г.

Приведен обзор результатов исследований и литературных данных о вкладе почвенных беспозвоночных животных, участвующих в деструкционных процессах различных видов фитомассы и растительных остатков в разных типах почв и экосистемах. Исследовали изменения структуры комплекса сообществ почвенных педобионтов в пространстве (распределение по профилю почвы) и во времени (весна–осень). Дан сравнительный анализ взаимосвязей между влажностью почвы и численностью почвенных беспозвоночных животных. Также определили показатели рН в копролитах дождевых червей и в почвах.

*Ключевые слова:* почва, педобионты, деструкционные процессы, фитомасса, экосистемы.

**DOI:** 10.31857/S0002188121070127

### ВВЕДЕНИЕ

Почва является средой обитания для разных таксономических групп педобионтов, включая нематод, коловраток и тихоходок, которые двигаются в почвенных порах, заполненных водой, и в пленочной воде, окружающей почвенные частицы. Клещи и ногохвостки обитают в верхних слоях почв с естественной системой почвенных ходов, заполненных воздухом. Почвенные беспозвоночные животные участвуют в разложении органических остатков и в биологическом круговороте веществ и энергии различных типов почв. На протяжении вегетационного периода запасы почвенной влаги непрерывно убывают и в летнее время в 1-метровом слое изменяются в пределах 20–32 мм и даже меньше.

На активность беспозвоночных животных влияют многочисленные факторы среды, среди которых значение имеют тип почвы, ее физико-химические свойства, а также применение удобрений и севообороты в агроценозах. Например, показано, что на разложение соломы в почве азот влиял сильнее, чем фосфор [1]. Известно, что гумусовый горизонт легкосуглинистых серых лесных почв, развивающихся под широколиственными лесами, имеет нейтральную реакцию ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  6.8), а в нижней части профиля становится слабокислым, отмечено высокое содержание гу-

муса в верхнем горизонте (4.0–5.5%) и относительно плавное уменьшение его с глубиной почвы [2]. Важным звеном в повышении биологической активности педобионтов является применение органических, минеральных удобрений и фитомассы растительных сидератов [3]. Травосмесь злаковых и бобовых культур при заделке в почву служит как сидератное зеленое удобрение и увеличивает в 1.0–1.5 раза качественный и количественный состав педобионтов [4].

Биосферные заповедники являются эталоном для экосистем Центральной лесостепной зоны Республики Молдова с бурыми и серыми лесными почвами. В структуре почвенного покрова заповедников значительную роль занимают серые лесные почвы. Большие площади земельных угодий с разными типами черноземов расположены в северной лесной и южной степной зонах и в лесостепной центральной зоне Республики Молдова. Гранулометрический состав этих почв соответствует среднесуглинистым черноземам: от порошисто-глыбисто-мелкокомковатой, через глыбисто-мелкокомковатую до комковато-зернистой. Величина рН почвенного раствора меняется от слабощелочного (7.6) до слабокислого (6.6) в лесном массиве [6].

Среди беспозвоночных, облигатно связанных с почвой в течение всего жизненного цикла либо



его активных стадий, имеются много крупных форм, размеры которых значительно превосходят пространство между почвенными частицами. Это — аэробные формы, нуждающиеся в относительно большом воздушном пространстве с достаточно высоким содержанием кислорода [7].

Важная роль принадлежит соломе в увеличении содержания гумуса в почве, т.к. коэффициент гумификации соломы больше, чем у других видов органики [8]. Растения-торфообразователи подвержены максимальному разложению под влиянием различных факторов окружающей среды. Степень разложения осок, хвоща, рогоза, папоротника, листовенного опада составляет 56.2% в среднем, в течение 5-ти лет. Фитомасса ежегодно отмирающей растительности не остается на поверхности почвы, она, частично погребенная в почве, разрушается достаточно быстро, вследствие чего накопление опада в этих условиях бывает незначительным. Мхи, лишайники, древесина относятся к группе трудно разлагающихся растений [9]. Органическое вещество является важнейшим компонентом, выполняющим многочисленные эколого-биосферные и биогеоэкологические функции в формировании почв и регулировании уровня их плодородия [10].

Педобиота вместе с микробиотой участвует в круговороте веществ и энергии, а также активно ускоряет разложение фитомассы листовой подстилки и растительных остатков. Кроме этого, создаются условия для образования гумуса, т.к. лигнин в кишечнике животных отделяется от усвояемых веществ растительных тканей. Высокая доля гумификаторов-педобионтов (олигохет, микроартропод и почвенных насекомых) находится в составе эдафона сапрофильного комплекса и участвует в деструкции растительных остатков и почвообразовательных процессах. Бактерии, а также актиномицеты — наиболее важная группа почвенных организмов. Многие бактерии способны разлагать более простые углеводы, другие как аэробные, так и анаэробные виды, разлагают клетчатку до дисахаридов, целлобиозы и до глюкозы, наконец, третьи разлагают белки [11]. Автотрофные бактерии окисляют аммиак до нитритов, а затем до нитратов (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*). Известно, что аэробные виды *Azotobacter*, анаэробные виды *Clostridium*, бактерии *Rhizobium*, обитающие в корневых клубеньках бобовых растений, связывают газообразный азот из воздуха. Например, в Дании на суходольных лугах свободноживущие нематоды переваривают за год  $\approx 80$  кг бактериальной массы, что соответствует 20 кг азота. Сапробионтные виды микроартропод питаются с бактериями и грибами и участвуют в ме-

ханическом измельчении труднодоступного для многих микроорганизмов материала, освобождая целлюлозу и лигнинсодержащие вещества, которыми обогащаются экскременты животных. Большая часть стрептомицетов разлагают хитин, который является составной частью покровов членистоногих и встречается в стенках клеток грибов. Его разложение, наряду с белковым обменом, служит одним из источников аммиака. Биомасса свободно живущих почвенных нематод содержит значительное количество белка, богатого азотом, что определяет значение нематод с позиций их влияния на баланс азота в почве [11]. Для растений это означает благоприятное равномерное распределение азота в почве. Микроартроподы могут переваривать мягкие ткани мезофила отмерших растений. Типичными сапробионтами являются орибатидные клещи, питающиеся в основном бактериями и грибами.

При исследовании пространственного распределения червей в почве саванны в работе [12] предположили, что их распределение также определяется популяционными взаимоотношениями видов. Было показано, что чем меньше размер особей конкретного вида дождевых червей, тем более они агрегированы.

Для питания педобионтов большое функциональное значение имеет постоянное поступление в почву органических остатков, которые влияют на увеличение численности и видового состава эдафического комплекса [13].

Цель работы — определение структуры комплексов почвенных беспозвоночных животных в разных типах почв при одновременном определении показателя pH в копролитах дождевых червей и почвы, проведение сравнительного анализа взаимосвязей между влажностью почвы и численностью педобионтов. Особое внимание было уделено комплексу сапрофагов, участвующих в деструкции разных видов фитомассы растительных остатков.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование почвенных беспозвоночных животных проводили в разные сезоны года в период 1992–2017 гг. и в различных географических зонах на территории Республики Молдова во всех экосистемах с разными типами почв: 1 — северная зона, лесной природный заповедник Пэдуреа Домнеаскэ, 2 — центральная зона, заповедники Кодры и Плаюл Фагулуй, 3 — южная зона Республики Молдова, заповедник Прутул де жос. Дополнительно исследовали почвы различных типов лесов и пойменных лугов малых рек, а также

другие экосистемы как степь, агроэкосистемы, низовые пойменные луга р. Днестр, Прут и дельты р. Дунай и их лесные экосистемы. Педозоологические обследования почв начались в 1990 г. в длительных стационарах, в полевых и природных условиях. Схема опытов имела следующие варианты: 1 — серая лесная почва (заповедник Кодры) с лесным биотопом рода *Quercus*, (фитомасса подстилки рода *Quercus*), 2 — бурая лесная почва (заповедник Кодры) с лесным биотопом рода *Fagus*, 3 — чернозем карбонатный, степь с разными видами спонтанной флоры злаковых и бобовых растений, 4 — чернозем луговой с разными видами луговых растений, 5 — черноземы занятых под пашню пойменно-луговых лесных экосистем. Чернозем обыкновенный — под посевом пшеницы, чернозем типичный — под посевом гороха.

Опыты по изучению интенсивности разложения разных видов фитомассы растительных остатков с участием дождевых червей были заложены в естественных экосистемах в полевых условиях. В специальные микрососуды вносили 1 кг почвы + 100 г фитомассы подстилки + 10 экз. дождевых червей вида *Allobophora rosea*, сосуды закапывали в почву на глубину 40–50 см. Контролем для каждого типа почв и подстилки были сосуды с 1 кг почвы + 100 г растительных остатков, но без дождевых червей. Параллельно и дополнительно эти варианты закладывали в лабораторных условиях, где исследовали скорость разложения разных видов фитомассы растительных остатков с участием дождевых червей.

Для выявления эдафической фауны пробы были собраны в 2-х слоях почвы: на глубине 0–25 см и 25–50 см [5]. Учеты мезофауны почвенных насекомых и жужелиц проводили в ловушках Барбера (банки 0.7 л) [5]. В качестве фиксатора использовали формалин. Для изучения распределения микрофауны и отдельных фаз мезофауны эдафических насекомых в почве, а также выяснения некоторых особенностей фенологии массовых видов был использован метод анализа почвенных проб. Почвенные ямы копали по стандартной методике площадью 0.5 м<sup>2</sup>. Пробы разбирали послойно вручную. Экстракцию микрофауны орибатид и коллембол из почвы проводили с помощью термоэксектора. В экстракции энхитрид из почвы использовали гидротермоэксектор в течение 3-х ч. Нематод выделяли вороночным методом [5]. Учеты были проведены в 1992–2017 гг. с марта по ноябрь. Были определены запасы зообиотной биомассы и таксономический состав комплексов почвенных беспозвоночных животных в разных типах почв. Полученные

данные обработаны с помощью методов математической статистики.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость разложения фитомассы растительных остатков зависела от комплекса факторов как биотических (педобиота и микробиота (эдафон)), так и абиотических/физических факторов (географическая зона, характер рельефа, климат и погода), количества осадков и продолжительности солнечных дней, колебаний максимальных и минимальных температур, гидрографической сети, влажности воздуха и запасов почвенной влаги, направлении и скорости ветра, физико-химических свойств типов почв, а также среднего для данной местности содержания гумуса и гранулометрического состава почвы, pH почвенного раствора, биоразнообразия флористического состава разных типов экосистем, структуры севооборотов сельскохозяйственных культур и частоты обработки почв в агроэкосистемах. В разных географических зонах на территории Республики Молдова с различными типами почв и экосистемами эдафический зоокомплекс формируют представители следующих таксономических групп почвенных беспозвоночных животных: Nematoda, Enchytraeidae, Lumbricidae, Chilopoda, Diplopoda, Symphyla, Pauropoda, Isopoda, Collembola, Oribatida, Carabidae, Scarabaeidae, Staphylinidae, Elateridae, Tenebrionidae, Tardigrada (табл. 1).

Особенно отрицательно из природных факторов на снижение численности особей и видового состава влияли засушливые климатические условия, из других факторов отметили антропогенные, агротехнические, техногенные и некоторые экологические природные факторы, особенно эрозию почв, при которой происходит смыв педобиоты и микробиоты вместе с почвой.

В последнее время на изменения и трансформацию педозооценозов эдафического комплекса почвенных беспозвоночных животных отрицательно влияют повышенная аридизация климата, засухи и ксерофитизации экосистем, особенно в южной степной зоне Республики Молдова. В период летне-осенней засухи (июль–сентябрь) популяции комплекса почвенных беспозвоночных уменьшались, и они исчезали из верхнего горизонта, переходя к эстивации в нижних горизонтах почв (табл. 2). Отдельные виды дождевых червей сворачивались клубком, начинали строить защитные капсулы, а затем впадали в диапаузу. В период засухи, особенно когда почвенный термический режим составлял 30–31°C, и почва имела минимальную влажность 15–17%, во всех типах

**Таблица 1.** Таксономическая структура комплекса почвенных беспозвоночных животных (средние) в периоды 1992–2003 и 2004–2015 гг.

| Экологическая<br>группа педобионтов | 1992–2003 гг. ( <i>n</i> = 12)                          | 2004–2015 гг. ( <i>n</i> = 12)                     | Достоверность                                  |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                                     | количество, экз./м <sup>2</sup>                         |                                                    |                                                |
|                                     | слой почвы, см                                          |                                                    |                                                |
|                                     | 0–25                                                    | 25–50                                              |                                                |
| Nematoda                            | $\frac{302\,000 \pm 36\,000}{22\,100\text{--}382\,000}$ | $\frac{70\,000 \pm 8230}{51\,600\text{--}87\,900}$ | $t_{\text{факт}} = 6.3 > t_{05(12)} = 2.2$     |
| Enchytrieidae                       | $\frac{6060 \pm 902}{4080\text{--}8050}$                | $\frac{842 \pm 110}{600\text{--}1080}$             | $t_{\text{факт}} = 5.8 > t_{05(11)} = 2.2$     |
| Lumbricidae                         | $\frac{53.4 \pm 5.4}{41.4\text{--}65.4}$                | $\frac{20.3 \pm 1.7}{16.7\text{--}24.0}$           | $t_{\text{факт}} = 5.8 > t_{05(13)} = 2.2$     |
| Chilopoda                           | $\frac{18.7 \pm 1.4}{15.5\text{--}21.8}$                | $\frac{9.42 \pm 0.83}{7.59\text{--}11.3}$          | $t_{\text{факт}} = 5.6 > t_{05(19)} = 2.1$     |
| Diplopoda                           | $\frac{20.3 \pm 1.4}{17.2\text{--}23.3}$                | $\frac{10.8 \pm 0.9}{8.8\text{--}12.9}$            | $t_{\text{факт}} = 5.4 > t_{05(22)} = 2.1$     |
| Symphyla                            | $\frac{19.7 \pm 1.5}{16.3\text{--}23.0}$                | $\frac{9.83 \pm 1.12}{7.36\text{--}12.3}$          | $t_{\text{факт}} = 5.0 > t_{05(22)} = 2.1$     |
| Pauropoda                           | $\frac{23.0 \pm 1.4}{20.0\text{--}26.0}$                | $\frac{10.0 \pm 1.4}{6.8\text{--}13.2}$            | $t_{\text{факт}} = 6.3 > t_{05(22)} = 2.1$     |
| Isopoda                             | $\frac{21.9 \pm 2.0}{17.5\text{--}26.3}$                | $\frac{11.7 \pm 1.3}{8.9\text{--}14.4}$            | $t_{\text{факт}} = 4.8 > t_{05(22)} = 2.1$     |
| Collembola                          | $\frac{5930 \pm 527}{4770\text{--}7091}$                | $\frac{3010 \pm 209}{2550\text{--}3470}$           | $t_{\text{факт}} = 5.2 > t_{0.05(137)} = 2.0$  |
| Oribatida                           | $\frac{13\,700 \pm 460}{12\,700\text{--}14\,700}$       | $\frac{10900 \pm 1020}{8620\text{--}13100}$        | $t_{\text{факт}} = 0.00003 < t_{05(16)} = 2.1$ |
| Carabidae                           | $\frac{22.3 \pm 1.5}{19.03\text{--}25.63}$              | $\frac{18.4 \pm 1.2}{15.7\text{--}21.1}$           | $t_{\text{факт}} = 0.5 < t_{05(22)} = 2.1$     |
| Scarabaeidae                        | $\frac{17.7 \pm 0.7}{16.1\text{--}19.2}$                | $\frac{11.3 \pm 0.8}{9.53\text{--}12.7}$           | $t_{\Phi} = 5.8 > t_{05(22)} = 2.1$            |
| Staphylinidae                       | $\frac{20.8 \pm 1.0}{18.7\text{--}23.0}$                | $\frac{11.8 \pm 1.4}{8.6\text{--}14.9}$            | $t_{\text{факт}} = 5.0 > t_{05(22)} = 2.1$     |
| Elateridae                          | $\frac{22.0 \pm 2.2}{7.2\text{--}26.8}$                 | $\frac{13.6 \pm 0.7}{12.0\text{--}15.2}$           | $t_{\text{факт}} = 3.7 > t_{05(14)} = 2.2$     |
| Tenebrionidae                       | $\frac{23.7 \pm 1.5}{20.4\text{--}26.6}$                | $\frac{14.7 \pm 0.8}{12.9\text{--}16.4}$           | $t_{\Phi} = 5.4 > t_{05(18)} = 2.1$            |
| Tardigrada                          | $\frac{1810 \pm 725}{213\text{--}3400}$                 | $\frac{905 \pm 52}{791\text{--}1020}$              | $t_{\text{факт}} = 0.002 > t_{05(11)} = 2.2$   |

Примечания. 1. Над чертой – среднее  $\pm$  ошибка среднего, под чертой – размах показаний. 2. В скобках ( $n$ ) – количество лет наблюдений. 3. Определение существенности различий средней проводили, используя  $t$ -критерий Стьюдента. 4. Учитывали все экологические группы нематод по характеру питания: настоящие сапробионты, гемисапробионты, параризобионты, фитопаразиты, хищники, которые обитают в эдафической среде.

**Таблица 2.** Среднее многолетнее относительное обилие (численность, экз./м<sup>2</sup>) педобионтов в различных горизонтах почв в весеннем сезоне (1992–2017 гг.)

| Тип почвы                             | Глубина, см | Биомасса, г/м <sup>2</sup> | Численность мезофауны, экз./м <sup>2</sup> | Численность сем. Lumbricidae, экз./м <sup>2</sup> | Количество копролитов, г/м <sup>2</sup> | Количество ходов/м <sup>2</sup> |
|---------------------------------------|-------------|----------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| Бурая лесная почва (заповедник Кодры) | Ad (0–10)   | 19.7                       | 78                                         | 67                                                | 228–254                                 | 778                             |
|                                       | A1 (10–25)  | 6.6                        | 52                                         | 19                                                |                                         |                                 |
|                                       | A2 (25–35)  | 3.2                        | 8                                          | 10                                                |                                         |                                 |
| Серая лесная почва (заповедник Кодры) | Ad (0–11)   | 28.6                       | 97                                         | 82                                                | 286–300                                 | 987                             |
|                                       | A1 (11–28)  | 7.8                        | 64                                         | 26                                                |                                         |                                 |
|                                       | A2 (28–38)  | 4.3                        | 12                                         | 10                                                |                                         |                                 |
| Чернозем карбонатный                  | Ad (0–8)    | 14.9                       | 175                                        | 37                                                | 157–166                                 | 690                             |
|                                       | A1 (8–25)   | 13.0                       | 126                                        | 69                                                |                                         |                                 |
|                                       | B (23–30)   | 3.9                        | 12                                         | 19                                                |                                         |                                 |
| Чернозем обыкновенный                 | Ad (0–10)   | 20.9                       | 164                                        | 73                                                | 133–145                                 | 586                             |
|                                       | A1 (10–21)  | 11.8                       | 72                                         | 40                                                |                                         |                                 |
|                                       | A2 (21–47)  | 3.7                        | 22                                         | 18                                                |                                         |                                 |
|                                       | B1 (47–65)  | 1.2                        | 3.6                                        | 3.9                                               |                                         |                                 |
| Чернозем типичный                     | Ad (0–22)   | 19.8                       | 352                                        | 224                                               | 120–123                                 | 430                             |
|                                       | A1 (22–45)  | 11.0                       | 14                                         | 6                                                 |                                         |                                 |

почв экосистем отмечали минимальную численность педобионтов.

Педобиота в зависимости от стратификации горизонтов почв имеет следующее распределение: *L* – подстилка, *F* – гумусный слой растительных остатков относительно насыщенный гуминовыми веществами, *H* – гумус Брута, (микоген), *A1* – почва минеральная с зоогенным гумусом, *A2* и *A3* – почва минеральная с минимальным гумусом, элювиальная, *B1*, *B2*, *B3* – подгоризонты с минеральными иллювиальными почвами, *C1* – материнская порода измельченная.

В зависимости от горизонта почвы, наибольшее количество почвенных беспозвоночных животных выявили в обыкновенном и карбонатном черноземах и относительно наименьшее – в типичном черноземе (табл. 2). В лесных экосистемах максимальную плотность педобионтов в зависимости от горизонта почвы (численность, биомасса, количество копролитов и ходов), включая и сем. Lumbricidae, выявили в серой лесной почве (заповедник Кодры), после нее следовала бурая лесная почва (заповедник Кодры). Эдафические сапрофаги – беспозвоночные животные, включая почвенных олигохет, пробуравливают почву, поглощая частицы почвы вместе с пищей, перемешивая в кишечнике органические и минеральные вещества почвы и выделяют их в виде экскрементов (копролитов), способствуя

образованию глинисто-перегнойных комплексов.

Дождевой червь в сутки обычно потребляет 200–300 мг сухой массы почвы на 1 г собственной массы в зависимости от вида. Пища через кишечник проходит не более чем за 22–24 ч. За 1 сут он может перерабатывать в среднем 10 мг сухой массы почвы, смешанной с остатками листьев и растений на 1 г массы тела. О количестве потребляемой червями пищи дают представление следующие результаты. Во влажном бурой лесной почве в термостате при 17°C вид *Lumbricus rubellus* потреблял 200–250 мг сухой массы в сутки на 1 г собственной массы (табл. 3). В кишечнике дождевых червей происходило ускорение разложения веществ из растительных остатков. Экскременты олигохет и почвенных насекомых являются одним из субстратов целлюлозоразрушающих микроорганизмов: например, 12 мг экскрементов обеспечивают активность 7.8 млн этих деструкторов. Копролиты удерживают больше воды, чем окружающая почва: воды в них было больше на 44%, чем в суглинистых почвах, и на 98.7% больше, чем во влажных луговых почвах.

Количество ходов зависело от экологических показателей почвы, ее плотности, численности и диаметра дождевых червей. Некоторые виды из родов *Allolobophora* и *Lumbricus* являются довольно крупными, имеют толщину до 1 см и отлича-

**Таблица 3.** Почвенно-биологические средние многолетние показатели активности педобионтов в различных типах почв в осеннем сезоне (1992–2017 гг.)

| Тип почвы                             | Глубина, см | Количество беспозвоночных сапробионтов нематод, экз./м <sup>2</sup> | Биомасса, г/м <sup>2</sup> | Численность сем. Lumbricidae, экз./м <sup>2</sup> | Биомасса сем. Lumbricidae, г/м <sup>2</sup> | Фитомасса подстилки, г/м <sup>2</sup> | Время разложения фитомассы, лет | Содержание гумуса с учетом разложившейся органики, % |
|---------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|
| Серая лесная почва (заповедник Кодры) | 0–50        | 189                                                                 | 40.9                       | 67.8                                              | 79.9                                        | 0.3                                   | 2.8–3.0                         | 3.8–4.0                                              |
| Бурая лесная почва (заповедник Кодры) | 0–50        | 161                                                                 | 34.1                       | 57.4                                              | 62.5                                        | 0.5                                   | 3.5–4.0                         | 2.7–3.6                                              |
| Чернозем карбонатный (степь)          | 0–50        | 133                                                                 | 27.4                       | 45.2                                              | 49.9                                        | 0.22                                  | 1.2–1.5 (2014–2015 гг.)         | 3.4–4.7                                              |
| Чернозем пойменно-луговых лесов       | 0–50        | 240                                                                 | 45.0                       | 88.9                                              | 90.5                                        | 0.37                                  | 1.7–2.0 (2014–2016 гг.)         | 3.9–4.3                                              |
| Чернозем обыкновенный (посев пшеницы) | 0–50        | 86.9                                                                | 18.7                       | 12.0                                              | 2.0                                         | 0.99                                  | 1.0–1.4 (2014–2015 гг.)         | 1.2–1.8                                              |

Примечание. Учитывали по характеру питания только экологические группы нематод, относящиеся к настоящим сапробионтам, гемисапробионтам, которые участвуют в почвообразовательных процессах в эдафической среде.

ются расширенным и уплощенным задним концом тела.

В теплом вегетационном периоде популяция из 25 особей дождевых червей на 1 м<sup>2</sup> проделывали в почвы 800 шт./м<sup>2</sup> ходов с диаметром 7–8 мм, что создавало благоприятные условия для воздушного и водного режимов почвы (проникновения воды и аэрации).

По нашим многолетним наблюдениям, повышенная активность педобионтов в серых лесных почвах природных экосистем (заповедник Кодры) со средней биомассой 40.9 г/м<sup>2</sup> и плотности заселения беспозвоночными 189 экз./м<sup>2</sup>, включая и сем. Lumbricidae с численностью 67.8 экз./м<sup>2</sup>, способствовала процессам полной трансформации органических веществ фитомассы в течение 2.8–3.0 лет, и увеличению содержания гумуса до 3.8–4.0%, что поддерживало качественное состояние структуры почвы. Биомасса разных эколого-фаунистических групп почвенных животных в серых лесных почвах (заповедник Кодры) в среднем составляла 40.9 г/м<sup>2</sup>, а зоомасса сем. Lumbricidae – 79.9 г/м<sup>2</sup>. Соответственно в бурой лесной почве содержалось педобионтов 34.1 г/м<sup>2</sup>, сем. Lumbricidae – 62.5 г/м<sup>2</sup> и всего общая средняя биомасса составляла 217 г/м<sup>2</sup>. В вегетационный период, длящийся 216 сут, разные эколого-таксономические группы почвенных животных совместно с семейством Lumbricidae за 1 сут в серых и бурых лесных почвах перерабатывали 905 г поч-

вы/м<sup>2</sup> вместе с растительными остатками, что в перерасчете на всю площадь заповедника “Кодры” составило 906 т почвы/сут или 196000 т почвы, смешанной с фитомассой подстилки и растительных остатков/в год.

Значительную скорость разложения фитомассы растительных остатков с участием дождевых червей наблюдали на микроделянках с типичным черноземом и растительными остатками гороха и с черноземом карбонатным с фитомассой степных злаковых растительных остатков (табл. 4). Время разложения разных видов фитомассы с участием дождевых червей в варианте с серой лесной почвой составляло 1.6 года, в контроле без червей – 2.1 года, в опытном варианте с бурой лесной почвой – 2.4 года и в контроле – 3.2 года.

В период 2014–2015 гг. разложение фитомассы в черноземе карбонатном (степь) длилось от 1.2 до 1.5 лет, в черноземе пойменно-луговых лесов – 1.7–2.0 года, в 2014–2016 гг. черноземе обыкновенном под посевом пшеницы – 1.0–1.4 года.

Сравнение скорости разложения фитомассы в зависимости от типа растительных остатков и от времени полного ее разложения показало, что максимальная скорость разложения фитомассы была характерна для варианта с черноземом типичным, растительными остатками гороха + червями вида *A. Rosea*, минимальная – в контроле без червей. Для педобионтов-сапрофагов мерой биологической продуктивности служит количество

**Таблица 4.** Интенсивность разложения разных видов фитомассы растительных остатков при участии дождевых червей

| Вариант                                                                                                 | Вид дождевых червей<br>(количество особей,<br>экз./сосуд) | Время полного<br>разложения<br>фитомассы, лет | Содержание<br>гумуса, % | Размер частиц<br>в комочках<br>копролитов, мкм |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|
| Серая лесная почва                                                                                      |                                                           |                                               |                         |                                                |
| 1 кг почвы + 100 г фитомассы<br>подстилки + черви рода <i>Quercus</i>                                   | <i>Allobophora rosea</i> (10 экз.)                        | 1.6                                           | 3.3                     | 1700                                           |
| 1 кг почвы + 100 г фитомассы<br>подстилки без червей (контроль)                                         | Без дождевых червей                                       | 2.1                                           | 2.6                     | 1200                                           |
| Бурая лесная почва                                                                                      |                                                           |                                               |                         |                                                |
| 1 кг почвы + 100 г фитомассы<br>подстилки + черви рода <i>Fagus</i>                                     | <i>Allobophora rosea</i> (10 экз.)                        | 2.4                                           | 2.7                     | 1600                                           |
| 1 кг почвы + 100 г фитомассы<br>подстилки без червей (контроль)                                         | Без дождевых червей                                       | 3.2                                           | 1.5                     | 1100                                           |
| Чернозем карбонатный                                                                                    |                                                           |                                               |                         |                                                |
| 1 кг почвы + 100 г фитомассы<br>степных злаковых растительных<br>остатков + черви рода <i>Fagus</i>     | <i>Allobophora rosea</i> (10 экз.)                        | 1.2                                           | 3.8                     | 1900                                           |
| 1 кг почвы + 100 г фитомассы<br>степных злаковых растительных<br>остатков без червей (контроль)         | Без дождевых червей                                       | 1.8                                           | 2.4                     | 1400                                           |
| Чернозем пойменно-луговой                                                                               |                                                           |                                               |                         |                                                |
| 1 кг почвы + 100 г фитомассы<br>разных видов луговых растительных<br>остатков + черви рода <i>Fagus</i> | <i>Allobophora rosea</i> (10 экз.)                        | 1.7                                           | 3.2                     | 1800                                           |
| 1 кг почвы + 100 г фитомассы<br>разных видов луговых растительных<br>остатков без червей (контроль)     | Без дождевых червей                                       | 2.2                                           | 2.0                     | 1300                                           |
| Чернозем типичный                                                                                       |                                                           |                                               |                         |                                                |
| 1 кг почвы + 100 г растительных<br>остатков гороха + черви рода <i>Fagus</i>                            | <i>Allobophora rosea</i> (10 экз.)                        | 1.0                                           | 1.5                     | 1100                                           |
| 1 кг почвы + 100 г растительных<br>остатков гороха без червей (контроль)                                | Без дождевых червей                                       | 1.4                                           | 1.0                     | 1000                                           |
| Чернозем обыкновенный                                                                                   |                                                           |                                               |                         |                                                |
| 1 кг почвы + 100 г растительных<br>остатков пшеницы + черви рода <i>Fagus</i>                           | <i>Allobophora rosea</i> (10 экз.)                        | 1.4                                           | 1.8                     | 1200                                           |
| 1 кг почвы + 100 г растительных<br>остатков пшеницы без червей<br>(контроль)                            | Без дождевых червей                                       | 1.7                                           | 1.2                     | 1100                                           |

переработанной ими фитомассы органических веществ листовного покрова и растительных остатков. Время и скорость разложения мертвых растительных остатков, листовного покрова и животного вещества зависит от характера ландшафта, времени года и от глубины и типа почвы, в которых находятся эти остатки. В разных типах стационарных экосистем (лесные экосистемы, луг, степь, агробиоценозы) проводили опыты, но не с мертвыми растительными остатками и лист-

венным покровом (подстилкой), а с зеленой фитомассой растений и зелеными листьями различных видов деревьев, которую закапывали в почву на глубину до 30 см на микроделянках площадью 1 м<sup>2</sup>, без почвенных беспозвоночных животных. Максимальное число особей почвенных беспозвоночных, посетившее фитомассу полуразложившихся растений и листьев, отмечено в луговых почвах, после них следовали лесные и степные почвы, минимальное количество было

**Таблица 5.** Величины показателей pH раствора копролитов дождевых червей вида *Allobophora rosea* и почвенных растворов

| Тип почвы          | pH раствора копролитов | pH почвенного раствора |
|--------------------|------------------------|------------------------|
| Серая лесная почва | 7.3                    | 5.5–6.9                |
| Буряя лесная почва | 6.6                    | 5.2–5.7                |
| Чернозем           | 7.9                    | 6.7–7.0                |

зафиксировано в почве пашни, а также в осеннем сезоне в сентябре. Значительную скорость разложения растительных остатков наблюдали в степной почве, где разложение зеленой фитомассы растений происходило быстрее, чем в других биотопах, после нее следовали луговая и лесная растительная фитомасса и листья. Во всех случаях скорость разложения уменьшалась с глубиной. Показано, что начиная с 50–60 см до 80 см происходило уменьшение числа педобионтов и одновременно было отмечено минимальное разложение фитомассы растений и листьев. Увеличение численности и видового состава педобионтов в зависимости от глубины почвы и одновременно максимальную интенсивность разложения зеленой фитомассы растений и листьев наблюдали во всех типах экосистем (лес, луг, степь, агробиоценозы) в пахотном слое 0–25 см почв.

В опытных лабораторных условиях выявили, что одна особь дождевого червя вида *Allobophora rosea* со средней биомассой 0.9 г, размером 7 см, диаметром 6 мм в течение 24 ч может переработать и трансформировать в копролиты 33.1 мг органического материала. Средняя биомасса копролитов одной особи дождевого червя вида *Allobophora rosea* в течение 1-го года составила 1 кг. В течение 24 ч, при средней численности 25 экз. дождевых червей/м<sup>2</sup> трансформировалось 82.8 г почвы/м<sup>2</sup>. Например, в течение 24 ч 25 особей дождевых червей/м<sup>2</sup> с биомассой 22.5 г перерабатывали 22.5 кг почвы/га. За вегетационный период продолжительностью 216 сут со средней численностью дождевых червей 25 экз./м<sup>2</sup> и соответственно 25000 экз./га перерабатывается до 2.2 т почвы/га. Также популяция дождевых червей за вегетационный период перерабатывает 1.4 т листовой подстилки/га и смешивает 1.3 т почвы/га.

Питаются дождевые черви отмершими частями растений или богатым перегноем почвы. Органические вещества, ее перегной служит пищей, а заглатываемые песчинки способствуют их перетиранию и измельчению. Переработанную таким образом и прошедшую через кишечник пищу черви выбрасывают на поверхность почвы в

виде экскрементов или копролитов. Они представляют собой оформленные комочки, частицы которых по размерам чаще всего не отличаются от частиц почвы, иногда бывают меньше, но их pH более нейтральный, т.к. они подвергались воздействию секрета известковых желез, расположенных в стенках глотки и выделяющих в кишечник конкреции углекислого кальция. Установлено, что величина копролитов червей сем. Lumbricidae зависела от диаметра их задней кишки (тифлостоля). У вида *Lumbricus terrestris* – более крупных форм дождевого червя – величина копролитов составляла 2000–3000 мкм, у вида *Allobophora rosea* – 1200–1700 мкм.

В серой лесной почве показатели pH раствора копролитов дождевых червей вида *Allobophora rosea* составляли 7.3, в бурой лесной почве – 6.6, в черноземе – 7.9 ед. Показатели pH почвенного раствора для серой лесной почвы составляли 5.5–6.9, бурой лесной почвы – 5.2–5.7 и чернозема – 6.7–7.0 (табл. 5).

Активность почвенных беспозвоночных животных зависит от параметров влажности почв, что подтверждается закономерностью пространственного распределения педобионтов в почвах и особенностью их сезонной динамики. Для каждой таксономической группы почвенных беспозвоночных животных существует свой оптимальный климат. Особенно губительны периоды, когда на педобионтов, герпетобионтов, хортобионтов одновременно действуют воздушная и почвенная засуха [14]. На фоне таких значительных флуктуаций структуры основных фитоценозов, рассмотрим соответствующие изменения в динамике почвенных беспозвоночных животных. Влажный и тепловой режим почв во многом определяет качественные и количественные биологические показатели почвенных беспозвоночных животных, от него зависят первичная продуктивность растительного покрова и вторичная биологическая продуктивность, а также продолжительность активности в почве педобионтов в вегетационном периоде [14]. В осеннем сезоне, в ноябре влажный режим почвы оптимальный, но одновременно существует минимальный тепловой режим почв, который влияет отрицательно на динамику численности и снижает плотность и активность почвенных беспозвоночных животных. Причиной снижения численности почвенных беспозвоночных животных рано весной (март) и поздно осенью (ноябрь) является минимальная температура почвы, независимо от того, есть ли достаточное количество влаги в почве. Почва весной медленно нагревается, а осенью ее температура постепенно снижается, и в таких эдафических

**Таблица 6.** Изменение численности почвенных беспозвоночных животных в зависимости от влажности почвы в течение года, %

| Группа педобионтов | Весна              |        |      | Лето               |       |        | Осень    |         |                    |
|--------------------|--------------------|--------|------|--------------------|-------|--------|----------|---------|--------------------|
|                    | март, 3-я декада   | апрель | май  | июнь, 1–2-я декада | июль  | август | сентябрь | октябрь | ноябрь, 1-я декада |
|                    | влажность почвы, % |        |      |                    |       |        |          |         |                    |
|                    | 64                 | 62     | 57   | 31                 | 15    | 12     | 16       | 42      | 50                 |
| Микрофауна         | 7.9                | 9.91   | 9.25 | 6.61               | 3.30  | 2.31   | 4.6      | 6.61    | 5.28               |
| Мезофауна          | 3.96               | 5.61   | 4.6  | 3.30               | 1.65  | 1.15   | 2.31     | 3.63    | 2.64               |
| Макрофауна         | 1.98               | 2.97   | 2.31 | 1.65               | 0.826 | 0.496  | 1.15     | 1.81    | 1.32               |

условиях наблюдают активность криофильных видов почвенных беспозвоночных животных. Зимой термический режим почв минимальный, поэтому активность почвенной биоты снижена, и в таких климатических условиях замедлены процессы разложения фитомассы растительных остатков со стороны педобиоты. При таких климатических условиях на деструкционные процессы фитомассы растительных остатков влияют больше минимальные температуры и относительно криофильные почвенные микроорганизмы. И наоборот, в теплом периоде максимальное разложение фитомассы растительных остатков обеспечивают разные экологические группы педобионтов в комплексе с абиотическими факторами. Благодаря интенсификации активности почвенной биоты в теплом вегетационном периоде скорость разложения фитомассы растительных остатков бывает максимальной по сравнению с холодным сезоном.

В последнее время из всего комплекса абиотических факторов наиболее отрицательно влияют на численность педобионтов засушливые климатические условия, особенно летом, начиная с 3-й декады июня, включая июль, август, когда наблюдают в различных типах почв уменьшение качественных и количественных биологических показателей почвенных беспозвоночных животных и параллельно — снижение фитомассы растительности. Температуры 32–36°C на большей части территории Республики Молдова уже являются летальными для эдафической фауны. Было показано, что в летний период снижалась численность экологических групп мезофильных и гидрофильных педобионтов.

Исследование корреляции между влажностью почвы и численностью педобионтов выявило наличие связи между этими показателями: при снижении влажности почвы уменьшалась численность почвенных беспозвоночных животных

(табл. 6). Содержание влаги в дерновом горизонте серых лесных почв в лесных биогеофитоценозах весной составляло 27–30%, в нижележащем 20–23%, т.е. было соответственно на 8–11 и 2–4% больше, чем в пахотных аналогах [14].

Во время вегетационного периода гидрологический режим почв на глубине 25 см свидетельствовал о том, что по мере движения с севера от лесных, луговых экосистем на юг к степным биогеоценозам влажность почв имела тенденцию к понижению, а термический режим почв, наоборот, к повышению, и соответственно качественный и количественный состав почвенных беспозвоночных животных сокращался. По мнению [15], в аридных экосистемах пространственное распределение почвенной биоты определяется во многом распределением в пространстве влаги и температурой поверхности почвы.

После осушения влажных (сырых) лугов с целью расширения площади сельскохозяйственных угодий уменьшилась влажность почв, кроме этого, произошло накопление минеральных солей, в основном хлористого натрия в сухих луговых почвах, что привело к их деградации. В результате большие площади луговых земель превратились в солонцовые и солончаковые почвы, особенно в южной степной зоне и на незначительных площадях в некоторых местах центральной лесостепной зоны Республики Молдова. Первыми обитателями солонцовых и солончаковых почв посттехногенных лугов были виды из семейства Carabidae из родов *Pogonus*, *Bembidion*, а также *Dichrotrichus pubescens*. Только в некоторых умеренных увлажненных местах с меньшей концентрацией солей в почве, начинали появляться другие виды педобионтов: (*Pterostichus cupreus* и *Amara*) или коротконадкрылых жуков (*Philonthus fuscipennis*).



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что ежегодное поступление растительного и листового опада от 3–5 т/га в почву и высокая активность почвенных беспозвоночных животных обеспечивало накопление 1.0–1.5% гумуса.

Сравнение времени полного разложения фитомассы (в годах) в зависимости от типа растительных остатков показало, что максимальная скорость разложения фитомассы была в варианте с черноземом типичным и растительными остатками гороха и червями рода *Quercus*: 1.0 год, в контроле – 1.4 года, минимальная в бурой лесной почве с фитомассой подстилки и червями рода *Fagus* – 2.4 года, в контроле – 3.2 года.

В лесных экосистемах численность, биомасса, количество копролитов и ходов педобионтов, включая и сем. Lumbricidae, в зависимости от горизонта почвы были максимальными в серой лесной почве (заповедник Кодры), затем следовала бурая лесная почва (заповедник Кодры).

Переработанную и прошедшую через кишечник пищу черви в виде копролитов выбрасывают на поверхность почвы. Величина pH раствора копролитов более нейтральная, т.к. их материал подвергался воздействию секрета известковых желез, расположенных в стенках глотки и выделяющих в кишечник конкреции углекислого кальция.

Аккумуляция фитомассы растительных остатков и подстилки лиственных лесов в разных типах почв является основой воспроизводства комплекса сапрофагов, активное функционирование которого определяет интенсификацию процессов разложения органического материала фитомассы растительного и животного происхождения, обогащает почву макро- и микроэлементами, гумусом, улучшает структуру почвы и повышает ее плодородие.

Сезонные изменения гидротермического режима почв влияют отрицательно на таксономический состав, численность и биомассу педобионтов, особенно в летнем сезоне, когда в разных типах почв снижаются качественные и количественные биологические показатели педобионтов.

В природных экосистемах при разнообразном таксономическом составе трофических групп педобионтов, которые участвуют в основных биолого-почвенных процессах, отмечена максимальная скорость разложения фитомассы растительных остатков и подстилки в разных типах почв разных агроландшафтов.

Установлено, что природные, техногенные, антропогенные факторы влияют на изменение

качественных и количественных биологических показателей и активность почвенных беспозвоночных животных.

Применение разных агротехнических приемов в агроэкосистемах отрицательно влияет на биоразнообразие таксономического состава и численность почвенной фауны, как компонента трофической цепи и соответственно минимизирует разложение растительных остатков в посевах разных видов сельскохозяйственных культур.

В многолетней динамике в почвах агроэкосистем определены минимальные тренды изменения видового состава, уменьшения биомассы, численности педобионтов и снижение уровня активности почвенных беспозвоночных животных в процессе разложения фитомассы растительных остатков и подстилки в пахотных почвах.

В почве с оптимальной влажностью и с остатками бобовых культур наблюдали увеличение численности ногохвосток, в иссушенных почвах с фитомассой злаковых растений больше размножались панцирные клещи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авров О.Е., Мороз З.М. Использование соломы в сельском хозяйстве. Л.: Колос, ЛО, 1979. 200 с.
2. Александрова А.Б., Гордиенко Т.А., Богданов А.В., Кибардина М.Л., Сабанцев Д.Н. Фауна и население дождевых червей почв рекреационной зоны Казани // Проблемы почвенной зоологии. Мат-лы XVI Всерос. совещ. почв. зоологии. 4–7 октября 2011 г., Ростов-на-Дону. М., 2011. С. 3–4.
3. Витион П.Г. Воздействие различных систем удобрения на динамику численности комплекса педобионтов // Агрохимия. 2016. № 9. С. 70–77.
4. Витион П.Г. Использование органо-минеральных удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур и зоомелиорация педобионтов // Международный. научн.-исслед. журн. Усп. совр. науки. ISSN 2412. 6608. Белгород, 2017. Т. 1. № 9. С. 138–142.
5. Гиляров М.С., Стриганова Б.Р. Количественные методы в почвенной среде. М.: Наука, 1987. 287 с.
6. Русанов А.М. Влияние Бузулукского бора на прилегающие ландшафты и свойства почв // Почвоведение. 2008. № 2. С. 146–152.
7. Стриганова Б.Р. Адаптивные стратегии освоения животными почвенного яруса // Почвоведение. 1996. № 6. С. 714–721.
8. Туев И.Н. Микробиологические процессы гумусообразования. М.: Агропромиздат, 1989. 239 с.
9. Уланов А.Н. Экологические аспекты восстановления болотных агроэкосистем на обработанных торфяных месторождениях южной тайги Кировской области // Сб. научн. тр. Вып. № 18 (66). М., 2018. С. 61–70.

10. Яшин М.А., Авдеева Т.Н., Козут Б.М., Маркина Л.К., Семенов В.М., Тарасов С.И., Фрид. А.С. Агрогенная трансформация лабильных гумусовых веществ и структуры дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Агрохимия*. 2015. № 9. С. 3–13.
11. Бабиева И.Б., Зенова Г.М. Биология почв. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 35–36.
12. Rossi J.-P. Short-range structures in earthworm spatial distribution // *Pedobiologia*. 2003. V. 47. P. 582–587.
13. Vition P. Metode de zooameliorare a organismelor nevertebrate pedobionte în agrobiocenozе. Chișinău: Institutul Național de Economie și Informație, Ministerul Economiei, Informație de sinteză, 1994. 36 p.
14. Vition P.G. Influența condițiilor climaterice asupra Oligochetelor // *Impactul calamităților naturale asupra mediului înconjurător*. Chișinău: Departamentul Protecția Mediului al Republicii Moldova, (D.P.M.R.M), (I.N.E.C.O), Serviciul “Hidrometeo”, 1995. P. 24–25.
15. Whitford W.G. The importance of the biodiversity of soil biota in arid ecosystems // *Biodiversity and Conservation*. 1996. V. 5. P. 185–195.

## Bioecological Significance of Pedobionts in the Transformation of Soil Organic Material

**P. G. Vition**

*Institute of Genetics, Physiology and Protection of Plants  
St. Pădurii 20, Chișinău MD-2002, Republic of Moldova  
E-mail: vitionpantelei@yahoo.com*

A review of the research results and literature data on the contribution of soil invertebrates involved in the destructive processes of various types of phytomass and plant residues in different types of soils and ecosystems is presented. Changes in the structure of the complex of communities of soil pedobionts in space (distribution according to the soil profile) and in time (spring–autumn) were studied. A comparative analysis of the relationship between soil moisture and the number of soil invertebrates is given. pH values were also determined in earthworm coprolites and in soils.

*Key words:* soil, pedobionts, destruction processes, phytomass, ecosystems.

УДК 631.416.9:546.73:631.445.25(470.1)

## КОБАЛЬТ В СИСТЕМЕ ПОЧВА–РАСТЕНИЕ НА ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ<sup>1</sup>

© 2021 г. Г. Я. Елькина

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН  
167982 Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия*

*E-mail: elkina@ib.komisc.ru*

Поступила в редакцию 19.01.2021 г.

После доработки 01.03.2021 г.

Принята к публикации 10.04.2021 г.

Выявлено, что поведение кобальта в системе почва–растения в условиях искусственного загрязнения определяется количеством элемента, спецификой культур и продолжительностью последствия. В низких концентрациях кобальт оказал стимулирующее действие на рост и развитие кормовых трав, при превышении оптимума происходило ингибирование и гибель растений. Транслокацию кобальта в растения больше максимально-допустимого уровня наблюдали при внесении элемента в почву в количестве 32 мг Со/кг. В связи со значительным возрастанием подвижности элемента в загрязненных почвах показана необходимость оценки экологического состояния почв по наличию подвижных форм.

**Ключевые слова:** кобальт, система почва–растение, подзолистые почвы, европейский Северо-Восток России.

**DOI:** 10.31857/S000218812107005X

### ВВЕДЕНИЕ

Кобальт относится к числу физиологически необходимых элементов для живых организмов. Входя в состав ферментов, кобальт активно влияет на поступление и обмен азотистых веществ, синтез хлорофилла и нуклеиновых кислот в растениях. Значим он для жизни клубеньковых бактерий и фиксации ими молекулярного азота [1, 2]. Особо велика роль кобальта для жизнедеятельности животных. Дефицит его в рационе вызывает ряд заболеваний (акобальтозы, анемии, авитаминозы). Являясь составной частью витамина В<sub>12</sub>, кобальт влияет на углеводный и жировой обмен, участвует в кроветворении и образовании гемоглобина. Животные, как и человек, этот витамин не синтезируют. В связи с этим важна обеспеченность им кормовых культур и продуктов питания [3–5].

При этом тяжелые металлы (ТМ), к которым относится кобальт, в избыточном количестве также вызывают заболевания животных и человека [4, 6]. В условиях техногенеза роль антропогенного фактора в формировании микроэлементного состава живых организмов значительно возрастает.

В связи этим актуально изучение взаимосвязей между содержанием кобальта в почве, продуктивностью растений и качеством продукции. Важен при этом региональный подход [7], обусловленный разнообразием почв, условиями возделывания и спецификой культур. На почвах с низким содержанием кобальта значимым остается улучшение минерального и биохимического состава растительной продукции.

Цель работы – изучение действия и последствия кобальта на продуктивность однолетних и многолетних трав и его транслокацию в растения на подзолистых почвах европейского Северо-Востока.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в пригороде г. Сыктывкара на легкосуглинистой пахотной подзолистой почве со следующей агрохимической характеристикой: рН 5.7, содержание гумуса – 1.9%, сумма обменных оснований – 6.1, гидролитическая кислотность – 2.6 ммоль/100 г, азот гидролизующий – 4.9 мг/100 г, содержание подвижных фосфора – 285 и калия – 122 мг/кг (по Кирсанову).

Изучение действия кобальта на растения начали в мелкоделяночном эксперименте (опыт 1),

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках госзадания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

где были смоделированы 3 контрастных по содержанию элемента уровня. Для создания первого из них внесли  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  в количестве 100 мг  $\text{Co}/\text{м}^2$ , что соответствовало установленной оптимальной дозе кобальта на подзолистых почвах Республики Коми — 1 кг/га. Второй уровень превышал первый в 10 раз, третий — в 100 раз. В пахотный горизонт с учетом его мощности (0–25 см) и объемной массы поступило от 0.3 до 33 мг  $\text{Co}/\text{кг}$  почвы. Площадь делянок — 1  $\text{м}^2$ , повторность четырехкратная. В первый год возделывали однолетние травы — горох (*Pisum sativa* (rehcbdjv)) сорта Альбумен и овес (*Avena sativa*) сорта Льговский-82 в смешанном посеве), на 2–3-й годы — клевер (*Trifolium pratense*) сорта Печорский улучшенный (последствие I, II), на 4-й год — овес (последствие III). В качестве фона под однолетние травы вносили N60P60K60, под клевер — N30P30K30.

Позднее были проведены микрополевые исследования в сосудах с возрастающим содержанием элемента (опыт 2). Почвенная масса с разным содержанием кобальта была получена путем смешивания почвы опыта 1 с почвой контрольных делянок. Доля загрязненной почвы от первого варианта к десятому последовательно повышалась от 1 до 10 кг/10 кг почвы. В загрязненной почве (время взаимодействия кобальта с почвой продолжалось 5 лет) в естественных условиях произошли трансформация внесенной соли и уравнивание форм элемента. Для подобных процессов требуются не менее 3-х лет [8]. Почву массой 10 кг помещали в полиэтиленовые сосуды без дна (диаметр — 20, высота — 30 см), которые зарывали в траншеи. Эксперимент выполняли в четырехкратной повторности в течение 2-х лет. В сосуды высевали по 15 семян гороха и овса, оставляя впоследствии по 10 растений каждого вида. Биомассу растений, как и содержание в них кобальта, определяли отдельно для гороха и овса.

Валовое содержание кобальта в почвах после разложения смесью азотной, фтористоводородной и хлорной кислот определяли методом атомной абсорбции на приборе фирмы “Hitachi” (модель 180–80 Z). В почвах, наряду с валовым содержанием, анализировали подвижные формы, переходящие в 1М  $\text{HCl}$ , ацетатно-аммонийный буфер (ААБ) pH 4.8. Определение ТМ в растениях осуществляли после разложения смесью азотной кислоты и перекиси водорода на СВЧ-минерализаторе “Минотавр-1” методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ПНДФ 16.1:2.3: 3.11–98).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реакция растений на микроэлементы во многом определяется содержанием их в почве. В незагрязненных почвах количество ТМ обусловлено рядом факторов, основными из которых являются содержание в материнской породе, направленность и интенсивность почвообразовательного процесса [7].

В разрезе, примыкающем к опытному участку, кобальт в большей мере сосредоточен в пахотном горизонте (6.91–7.99 мг/кг) (табл. 1). Сельскохозяйственное использование привело к обогащению обрабатываемой толщи кобальтом, чему способствовали смена древесной растительности на травянистую, а также применение удобрений и мелиорантов. Минимум кобальта пришлось на элювиальный горизонт А2В1 (3.63 мг/кг). Аккумуляция элемента (6.45 мг/кг) в иллювиальном горизонте А2В1(В1) была связана с тем, что он является геохимическим барьером в связи с утяжелением гранулометрического состава. Количество микроэлемента в материнской породе составило 4.17 мг/кг. В нижней части профиля преобладали кислоторастворимые формы кобальта (37–56% от общего его количества), что связано с более тяжелым гранулометрическим составом и низкой гумусированностью иллювиальной толщи. Содержание подвижной формы кобальта, экстрагируемое 1М  $\text{HCl}$ , в пахотном горизонте составило 1.02–1.40, ААБ — 0.18–0.25 мг/кг. Ацетатно-аммонийная вытяжка вытеснила незначительное количество элемента (от 2.6 до 9.4%), основная часть кобальта была закреплена почвенно-поглощающим комплексом (ППК).

Количество подвижного кобальта в подзолистых почвах региона составило 0.5–3.9 мг/кг, меняясь по шкале обеспеченности от бедных до среднеобеспеченных [9].

Валовое содержание кобальта в опыте 2 (табл. 1) с ростом доли загрязненной почвы увеличилось линейно с 6.2 в контроле до 65.5 мг/кг. Солянокислая вытяжка из почвы контроля извлекла 25.8% от общего количества. В первом варианте с кобальтом подвижность элемента увеличилась до 43.7%, в остальных вариантах вытяжка экстрагировала более половины поступившего в почву элемента.

Подвижность кобальта в контроле при использовании ААБ-вытяжки составила 2.9%, из загрязненной почвы буфер извлекал от 6.6 до 32.9% от общего содержания. Во 2-м варианте количество кобальта, экстрагируемое ААБ (5.3 мг/кг), превысило ПДК. Содержание подвижных форм при загрязнении возросло более интенсивно

**Таблица 1.** Содержание кобальта в почве опыта 2, мг/кг воздушно-сухой почвы

| Вариант       | Валовое | 1 М НСl-вытяжка |               | ААБ-вытяжка |               |
|---------------|---------|-----------------|---------------|-------------|---------------|
|               |         | мг/кг           | % от валового | мг/кг       | % от валового |
| Контроль (0)* | 6.2     | 1.6             | 25.8          | 0.18        | 2.9           |
| 1 (1)         | 15.1    | 6.6             | 43.7          | 2.5         | 16.6          |
| 2 (2)         | 20.1    | 10.5            | 52.2          | 5.3         | 26.4          |
| 3 (3)         | 30.9    | 17.4            | 56.3          | 9.1         | 29.4          |
| 4 (4)         | 32.1    | 18.3            | 57.0          | 10.2        | 31.8          |
| 5 (5)         | 37.5    | 22.5            | 60.0          | 11.6        | 30.9          |
| 6 (6)         | 46.0    | 25.7            | 55.9          | 15.1        | 32.8          |
| 7 (7)         | 48.7    | 26.7            | 54.8          | 16.1        | 32.9          |
| 8 (8)         | 55.3    | 30.1            | 54.4          | 16.9        | 30.6          |
| 9 (9)         | 57.7    | 32.3            | 55.5          | 19.1        | 33.1          |
| 10 (10)       | 65.5    | 32.6            | 49.8          | 19.1        | 29.2          |
| ПДК           |         |                 |               | 5.0         |               |

Примечание. Нумерация вариантов та же в табл. 3, 4.

\*В скобках – количество загрязненной почвы в почве сосуда на 10 кг, кг.

(в 20.4 раза – в 1М НСl-вытяжке и в 106 раз – в ААБ), чем увеличилось общее содержание (в 10.6 раза) элемента в почве. Солянокислая вытяжка характеризовала в основном потенциальный запас элемента, а ацетатно-аммонийный буфер извлекал наиболее мобильные и опасные с экологической точки зрения соединения.

Повышенное поступление кобальта, особенно в условиях слабой буферности подзолистых почв, обусловленной низким содержанием органического вещества и кислой реакцией среды, существенно повлияло на естественное состояние элемента в почве. Равновесие между количеством кобальта в твердой фазе почвы и почвенном растворе установилось на новом, существенно отличающемся от исходного, уровне. Поступившие в почву металлы вступают в реакции ионного обмена, сорбции-десорбции, соосаждения–растворения, комплексообразования [10]. Но при этом значительная их часть не закрепляется в ППК, оставаясь в почвенном растворе в свободном состоянии. Эти формы ТМ представляют большую опасность для растений, чем валовое их количество. В связи с этим оценка как обеспеченности микроэлементом, так и загрязнения им почв должна осуществляться по наличию подвижных форм. Дополнительным аргументом к этому послужило отсутствие пропорциональных связей между валовым содержанием кобальта и количеством экстрагируемых соединений.

Влияние кобальта на растения в эксперименте с контрастным загрязнением (опыт 1) началось с изменения всхожести семян. Если количество

взошедших растений на делянках с дозами кобальта 100 и 1000 мг/м<sup>2</sup> статистически не отличалось от фона, то на делянках с повышенной дозой всходы гороха и клевера отсутствовали. Доза 10000 мг/м<sup>2</sup> (100 кг/га) оказалась летальной для бобовых растений. Всхожесть овса при 3-м уровне загрязнения составила 57%. Бобовые растения в начальные стадии онтогенеза оказались более чувствительными к повышенным концентрациям кобальта, чем злаковые. Отдельные симптомы избытка кобальта начали проявляться еще при 2-м уровне в виде хлоротичных пятен на листьях гороха и светлых полос на листьях овса.

Влияние кобальта на физиологические и биохимические процессы в растениях сказалось на величине биомассы растений (табл. 2). Под действием оптимальной дозы (100 мг/м<sup>2</sup>) продуктивность кормовых трав и особенно гороха значительно увеличилась. Общая биомасса трав выросла на 52, гороха – на 148%. При 2-м уровне загрязнения (1000 мг/м<sup>2</sup>) продуктивность однолетних трав была близка к фону, но меньше, чем при оптимальном количестве элемента. Вследствие гибели гороха, снижения всхожести и ингибирования роста злакового растения при избытке кобальта при 3-м уровне (10000 мг/м<sup>2</sup>) произошло значительное уменьшение биомассы (–75% от фона).

Высокая продуктивность гороха была связана с положительным влиянием кобальта на азотный обмен в растениях [11], который значительно улучшился вследствие деятельности клубеньковых бактерий при обеспечении микроэлементом. Как показал визуальный осмотр корней гороха,

**Таблица 2.** Влияние кобальта на продуктивность растений и его транслокацию (опыт 1)

| Доза, мг/м <sup>2</sup> | Горохо-овсяная смесь, действие |          |                |          | Клевер 1-го года пользования, последствие I |          | Клевер 2-го года пользования, последствие II |          | Овес, последствие III |          |
|-------------------------|--------------------------------|----------|----------------|----------|---------------------------------------------|----------|----------------------------------------------|----------|-----------------------|----------|
|                         | горох                          | овес     | общая биомасса | % к фону | биомасса                                    | % к фону | биомасса                                     | % к фону | биомасса              | % к фону |
| Контроль                | 25/0.82**                      | 238/0.40 | 263            |          | 620/2.1                                     |          | 1050                                         |          | 62                    |          |
| 100 (0.3*)              | 62/3.1                         | 340/1.08 | 402            | 52       | 705/2.8                                     | 14       | 1210                                         | 15       | 63                    | 1        |
| 1000 (3.3)              | 24/11.8                        | 250/7.1  | 274            | 4        | 456/10.5                                    | –26      | 870                                          | –17      | 64                    | 3        |
| 10000 (33)              | 0                              | 66/13.7  | 66             | –75      | 0                                           | –100     | 0                                            | –100     | 20                    | –68      |
| <i>HCP<sub>05</sub></i> |                                |          | 28             |          | 55                                          |          | 110                                          |          | 7                     |          |

\*Среднее поступление в почву, мг/кг.

\*\*Над чертой — продуктивность, г воздушно-сухой массы/м<sup>2</sup>, под чертой — содержание в растениях, мг Со/кг воздушно-сухой массы.

при оптимальной дозе (100 мг/м<sup>2</sup>) отмечен рост числа клубеньков, их размера и интенсивности окраски по сравнению с контролем. Разное влияние кобальта на горох и овес обусловлено в основном биологическими видовыми особенностями растений. На метаболические процессы в растениях отразились как недостаток микроэлемента в почве контроля, так и избыток при повышенном содержании его в почве.

Последствие первой дозы кобальта (100 мг/м<sup>2</sup>) на клевере проявилось в меньшей мере, чем действие элемента на однолетние травы при непосредственном внесении. Биомасса многолетнего бобового растения при оптимальной дозе микроэлемента в оба года последствия была больше на 14–15%. Кроме затухающего действия причиной снижения эффективности элемента могло послужить то, что хорошо развитая покровная культура сдерживала рост клевера 1-го года жизни, что сказалось впоследствии. Вторая доза кобальта была токсичной для клевера, его биомасса была меньше чем в контроле. При максимальном загрязнении произошла гибель растений на стадии всходов.

С тем, чтобы проследить за токсичностью кобальта в последствии, в следующий сезон на делянках с максимальным загрязнением, на которых клевер погиб в год посева, был проведен посев гороха. В отличие от предыдущего года полной гибели растений не наблюдали, снижение биомассы составило 77%. Полученные результаты свидетельствовали о снижении ингибирующего действия поллютанта со временем. Вместе с тем овес, высеянный на 4-й год (табл. 2), при избытке кобальта (10000 мг/м<sup>2</sup>) продолжал испытывать токсическое действие (–68%).

Эффективность некорневых подкормок люпина узколистного, озимой пшеницы, ярового ячменя и люцерны кобальтом (удобрение Микро-Стим-Кобальт) также определялась уровнем обеспеченности почвы элементом и дозами микроудобрения. При низкой и средней обеспеченности почвы кобальтом отмечали стимулирующее действие, при избыточной — происходило снижение продуктивности [12]. Применение некорневых подкормок азотнокислым кобальтом многолетних трав на подзолистых почвах обеспечило высокую (20%) прибавку биомассы, на микроэлемент в большей мере отреагировал клевер, в нем усилился синтез белка [9].

С ростом поступления кобальта в почву увеличилась транслокация элемента в растения. Среди однолетних трав более высоким содержанием кобальта отличались бобовые растения (табл. 2). При применении оптимальной дозы содержание кобальта в кормовых травах соответствовало рекомендуемому показателю для жвачных животных. При более высоких дозах его количество в наземной биомассе трав превысило максимально допустимый уровень — МДУ [13], который для кормов естественной влажности составляет 1 мг/кг (6 мг/кг в пересчете на воздушно-сухое вещество).

В большинстве исследований ТМ применяют сверхвысокие дозы элементов с заведомо негативным действием на растения. Включение низких доз позволило определить резкие изменения в жизнедеятельности растений в зависимости от количества микроэлемента, внесенного в почву: оптимальные дозы улучшали рост и развитие растений, избыточные привели к снижению биомассы, гибели бобовых культур и излишнему накоплению элемента в растительной продукции. Дей-

**Таблица 3.** Продуктивность однолетних трав при возрастающих концентрациях кобальта (опыт 2)

| Вариант  | Содержание,<br>мг/кг (1 М НСl) | Масса одного растения (воздушно-сухая, г) |             |             |             |
|----------|--------------------------------|-------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|          |                                | первый год                                |             | второй год  |             |
|          |                                | горох                                     | овес        | горох       | овес        |
| Контроль | 1.6                            | 0.36 ± 0.05                               | 0.40 ± 0.04 | 0.15 ± 0.07 | 0.19 ± 0.04 |
| 1        | 6.6                            | 0.41 ± 0.04                               | 0.47 ± 0.05 | 0.16 ± 0.03 | 0.26 ± 0.03 |
| 2        | 10.5                           | 0.42 ± 0.04                               | 0.50 ± 0.06 | 0.15 ± 0.03 | 0.30 ± 0.04 |
| 3        | 17.4                           | 0.41 ± 0.04                               | 0.53 ± 0.04 | 0.16 ± 0.02 | 0.30 ± 0.03 |
| 4        | 18.3                           | 0.40 ± 0.04                               | 0.52 ± 0.07 | 0.19 ± 0.04 | 0.33 ± 0.04 |
| 5        | 22.5                           | 0.38 ± 0.03                               | 0.55 ± 0.07 | 0.19 ± 0.02 | 0.32 ± 0.04 |
| 6        | 25.7                           | 0.35 ± 0.03                               | 0.57 ± 0.07 | 0.17 ± 0.03 | 0.35 ± 0.05 |
| 7        | 26.7                           | 0.35 ± 0.02                               | 0.59 ± 0.07 | 0.15 ± 0.02 | 0.39 ± 0.04 |
| 8        | 30.1                           | 0.33 ± 0.03                               | 0.54 ± 0.06 | 0.16 ± 0.03 | 0.39 ± 0.04 |
| 9        | 32.3                           | 0.31 ± 0.02                               | 0.52 ± 0.05 | 0.17 ± 0.02 | 0.35 ± 0.04 |
| 10       | 32.6                           | 0.30 ± 0.02                               | 0.50 ± 0.06 | 0.15 ± 0.02 | 0.35 ± 0.04 |

ствие кобальта менялось от стимулирующего при его недостатке к токсическому — при избытке.

В эксперименте с возрастающими концентрациями кобальта в почве (опыт 2) такого существенного роста продуктивности под действием микроэлемента, как при непосредственном внесении (опыт 1) не наблюдали (табл. 3). В первый год прирост биомассы гороха на 15% отмечен в вариантах 2–4. В следующий год горох активнее развивался в вариантах 4 и 5, где валовое количество кобальта было больше и составляло 32.1–37.5 мг/кг. В вариантах с меньшим содержанием микроэлемента происходило постепенное снижение его эффективности. Биомасса овса в вариантах с микроэлементом в первый год превышала контроль на 17–47%. Тенденция к снижению продуктивности злакового растения по сравнению с максимальной происходила в 2-х последних вариантах при содержании валового кобальта 57.7–65.5 мг/кг. Это количество микроэлемента в почве было больше, чем внесено на 3-м уровне опыта 1 (33 мг Со/кг), при котором происходила гибель бобового и ингибирование роста и развития злакового растения. На 2-й год биомасса овса, как и в первый, была больше в вариантах с кобальтом.

Различия в росте и развитии растений, прежде всего гороха, в двух последовательных экспериментах связываем с тем, что смоделированные концентрации данного физиологически значимого элемента в опыте 2 были больше оптимальных: с варианта 2 содержание кобальта, извлекаемое ААБ, превысило ПДК (5 мг/кг). Разница также могла быть обусловлена тем, что поступление элемента в растения в замкнутом пространстве

сосуда отличалось от его поглощения в полевых условиях.

При анализе результатов опыта 1 отмечали некоторое снижение как стимулирующего, так и токсического эффекта во временном промежутке, процесс этот продлился в опыте 2. Чем продолжительнее металлы находятся в почве, тем в меньшей мере проявляется их токсичность в отношении растений [14, 15]. Снижение негативного действия ТМ со временем происходило и в экспериментах с медью, цинком и кадмием [16–18]. Спад токсичности обусловлен в основном закреплением элементов в ППК, определенный вклад вносит вымывание элементов за пределы пахотного горизонта и отчуждение растениями. Учитывая снижение биодоступности металлов в почвах со временем, следует использовать разные нормативы для свежего и старого загрязнения.

Действие кобальта в микрополевым опыте, так же как и в опыте 1, определялось поступлением элемента в растения. Вследствие слабой обеспеченности почв данным микроэлементом содержание его в растениях, особенно злаковых, в контроле было меньше рекомендуемого для кормов. С повышением концентрации кобальта в почве количество элемента в биомассе гороха увеличилось с 0.42 в контроле до 22.7 мг/кг (табл. 4), превышая МДУ, начиная с варианта 4 при содержании кобальта в почве 18.3 мг/кг (1 М НСl). Количество кобальта в наземной массе овса в целом было меньше (от 0.22 до 5.1 мг/кг), чем в биомассе гороха. При содержании в почве >30.1 мг Со/кг (1 М НСl) оно превысило нормируемый показатель. Содержание кобальта в горохе увеличива-

**Таблица 4.** Содержание ТМ в однолетних травах (первый год)

| Вариант  | Содержание элементов, мг/кг воздушно-сухой массы |    |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |
|----------|--------------------------------------------------|----|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|
|          | горох                                            |    |      |      |     |     | овес |      |      |      |     |     |
|          | Cu                                               | Zn | Co   | Pb   | Cd  | Ni  | Cu   | Zn   | Co   | Pb   | Cd  | Ni  |
| Контроль | 3.2                                              | 34 | 0.42 | 0.79 | 0.8 | 4.9 | 3.7  | 22   | 0.22 | 1.3  | 1   | 1.8 |
| 1        | 3.0                                              | 33 | 1.5  | 0.84 | 1.8 | 5.6 | 2.7  | 10.1 | 0.53 | 0.62 | 0.9 | 1.8 |
| 2        | 3.1                                              | 31 | 3.8  | 1.2  | 1.1 | 5.9 | 2.4  | 8.2  | 1.5  | 0.71 | 0.9 | 1.9 |
| 3        | 2.7                                              | 25 | 6.0  | 1.7  | 1.2 | 4.6 | 2.3  | 6.8  | 1.8  | 1.07 | 0.5 | 1.5 |
| 4        | 2.4                                              | 21 | 8.3  | 1.7  | 1.5 | 4.1 | 2.1  | 6.4  | 2.5  | 0.83 | 0.4 | 1.6 |
| 5        | 2.5                                              | 20 | 10.8 | 1.4  | 1.0 | 3.8 | 2.0  | 6.7  | 3.5  | 0.62 | 0.4 | 1.8 |
| 6        | 2.2                                              | 19 | 16.6 | 1.7  | 1.6 | 4.3 | 1.9  | 7.1  | 4.5  | 1.20 | 1.1 | 1.9 |
| 7        | 2.9                                              | 18 | 16.8 | 1.5  | 1.3 | 4.6 | 1.7  | 7.3  | 5.2  | 0.8  | 0.4 | 2.1 |
| 8        | 2.4                                              | 17 | 17.2 | 0.87 | 0.9 | 3.8 | 1.7  | 7.4  | 7.0  | 0.74 | 0.6 | 1.7 |
| 9        | 3.0                                              | 20 | 20.8 | 0.93 | 0.9 | 4.7 | 1.8  | 7.9  | 5.9  | 0.78 | 0.8 | 2.1 |
| 10       | 3.3                                              | 24 | 22.7 | 1.01 | 1.0 | 4.6 | 1.6  | 7.6  | 5.1  | 0.53 | 0.5 | 1.5 |

Примечание. Относительная погрешность анализа ( $\pm\delta\%$ ): Zn – 20, Cu – 20, Ni – 35, Pb – 25, Cd – 50, Co – 40%.

лось линейно, коррелируя с общим количеством элемента в почве ( $y = 0.411x - 4.1535$ ,  $R^2 = 0.97$ ,  $P < 0.001$ ). Близкая зависимость была характерна и для злакового растения ( $y = 0.1134x - 0.8462$ ,  $R^2 = 0.88$ ,  $P < 0.001$ ).

При наличии также линейной зависимости между поступлением кобальта в растения и количеством его в почве накопление микроэлемента в биомассе люцерны по мере увеличения обеспеченности супесчаной почвы этим элементом происходило более интенсивно, чем в злаковых культурах. При избыточном содержании элемента в почве количество его в растениях превысило уровень оптимальных концентраций [12].

Но в то же время изменения в содержании кобальта в тканях растений происходили более интенсивно, чем осуществлялся рост его количества в почве. Поглощение кобальта горохом в сравнении с контролем увеличилось в 50, овсом – в 20, тогда как общее содержание элемента в почве – в 10 раз. Изменения в количестве соединений, извлекаемых солянокислой вытяжкой, составили 20, а ААБ – более 100 раз. Различия в содержании элемента в наземной массе бобовой культуры более всего согласовались с количеством соединений, экстрагируемых буферной вытяжкой. Это подтвердило также наличие более тесной корреляции между содержанием элемента в биомассе гороха и количеством его в ААБ ( $y = 0.6237x - 1.33$ ,  $R^2 = 0.99$ ,  $P < 0.001$ ). В растениях овса связи между этими показателями были менее тесные ( $y = 0.3283x - 0.3018$ ,  $R^2 = 0.89$ ,  $P < 0.001$ ).

Одним из показателей, описывающих транслокацию элементов, является коэффициент накопления (**КН**) – соотношение между содержанием тестируемого элемента в наземной биомассе и общим количеством его в почве. В бобовом растении **КН** с ростом количества кобальта в почве увеличился с 0.07 в контроле до 0.36 в варианте 6, в овсе – с 0.04 до 0.13 в варианте 8, разница с контролем для гороха составила 5.3, злака – 3.6 раза. В дальнейшем показатель несколько стабилизировался, что связано со сдерживающим влиянием корневой системы. Более высокий **КН** был характерен для гороха: различия с овсом составили от 1.9 в контроле до 4.4 при максимальном содержании элемента в почве. Более интенсивное поступление микроэлемента в бобовую культуру определялось большей физиологической значимостью элемента для данного вида растений при содержании его в почве в пределах необходимости и более значительным сбоем в поглощении кобальта при превышении оптимума.

Нарушения в метаболизме растений вследствие повышенной транслокации кобальта в растения привели к изменениям в поглощении других элементов. Наиболее значительно изменилось поступление цинка: с ростом содержания кобальта в горохе количество цинка в нем, начиная с варианта 4, снизилось на 26–50%. Взаимоотношения в поглощении цинка и кобальта имели антагонистический характер, между их количеством установлена отрицательная корреляция ( $r = -0.79$ ,  $P < 0.001$ ). Содержание цинка в наземной массе овса в вариантах с кобальтом также было значительно меньше, однако связи между по-



ступлением элементов были менее тесные, чем в бобовом растении ( $r = -0.52$ ,  $P < 0.001$ ). Антагонизм обнаружен также между поступлением кобальта и меди в овес ( $r = -0.85$ ,  $P < 0.001$ ). Различия в транслокации элементов в растениях определяются их биологическими особенностями, доступностью элементов в почве, величиной продуктивной массы [9]. Сложный характер взаимодействия между поглощением цинка и кобальта растениями приведен также в работе [19].

При изучении поведения ТМ в системе почва–растение важным является определение концентраций, которые не вызывают снижение продуктивности (фактор толерантности) и не приводят к накоплению элементов в растениях в токсичных количествах (фактор транслокации). Множество одновременно действующих факторов как в почве, так и в растениях, затрудняют процесс регламентирования. Для решения практических вопросов необходимы критерии или количественные параметры загрязнения почв и растительной продукции ТМ. На основе связей между содержанием кобальта в почве, продуктивностью и поступлением элемента в растения попытались определить допустимые границы загрязнения подзолистых почв кобальтом при возделывании кормовых культур, учитывая особенности растений. В основу нормирования положили содержание ТМ (в том числе и подвижных форм) в почве, гарантирующее ненакопление токсичных элементов в товарной части продукции сверх МДУ и не вызывающее снижение продуктивности растений. Негативное уменьшение биомассы трав по сравнению с контролем в опыте 2 не установлено, в опыте 1 оно происходило при внесении кобальта в дозе 33 мг/кг. Превышение МДУ в биомассе гороха началось при валовом количестве элемента в почве, равном 32.2, содержании элемента в вытяжке 1 М НСl — 18.3, в ААБ — 10.2 мг/кг, для овса показатели транслокации составили соответственно 55.3, 30.1, 16.9 мг/кг. Сверхнормативное накопление кобальта в однолетних травах происходило при более низких количествах элемента, чем угнетение роста и развития растений.

При содержании кобальта, равном величине ПДК подвижной формы (5 мг/кг, ААБ-вытяжка), накопление элемента в травах сверх МДУ не наблюдали. Ухудшение качества растительной продукции началось при наличии в почве 10.2 мг Со/кг. Снижение продуктивности и превышение МДУ в биомассе происходило при более высоком содержании подвижного кобальта, чем нормируемый показатель. Использование ПДК подвижной формы для подзолистых почв вполне приемлемо: в его пределах не происходил спад продук-

тивности и сохранялось качество продукции. Необходимо также учесть то, что при непосредственном поступлении ТМ в почву регламентируемые показатели для почв должны быть меньше, чем для устоявшейся системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на поведении кобальта в системе почва–растение отразились специфика культур, его содержание и время взаимодействия с почвой. Повышение количества микроэлемента до оптимальных пределов вело к росту биомассы однолетних и многолетних трав, улучшению их микроэлементного состава, превышение оптимума вызвало ингибирование роста, развития и гибель растений. Повышенные концентрации кобальта в почве привели к интенсивному поступлению элемента в травы, ухудшая качество продукции. Сверхнормативная транслокация в кормовые травы происходила при более низких концентрациях элемента, чем вызывающая снижение продуктивности.

С ростом поступления кобальта в почву увеличилась его подвижность, поэтому наряду с валовым содержанием необходимо учитывать наличие подвижных соединений. Растения реагировали как на недостаток, так и на избыток элемента. Вследствие чего подход к изучению физиологически значимых элементов должен вестись с 2-х позиций как необходимых микроэлементов, так и потенциальных загрязнителей агроландшафтов с регламентацией их количества. При нормировании ТМ, важно учитывать показатели толерантности, транслокации и давности загрязнения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодин Б.А. Кобальт в жизни растений. М.: Наука, 1970. 343 с.
2. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
3. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека: экология, классификация, органопатология. М.: Медицина, 1991. 496 с.
4. Anke M., Gleis M., Muller R., Roth N., Dorn W., Schaffer U., Seifert M., Arnold W. Macro, trace and ultratrace element intake depending on the geological origin of the habitat, time, sex and form diet // Biogeochemistry and geochemical ecology. Moscow: Publ. GUN NPC TMG MZ RF, 1999. P. 235–263.
5. Сосорова С.Б. Кобальт в почвах и растениях дельты р. Селенга // Почвоведение. 2009. № 7. С. 806–813.
6. Белякова Т.М., Дианова Т.М., Крамкова Т.В. Медико-биохимические проблемы экологической безопасности населения России // Техногенез и био-

- химическая эволюция таксонов биосферы. М.: Наука, 2003. С. 275–288.
7. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
  8. Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 5. Этокотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. 148 с.
  9. Елькина Г.Я. Оптимизация минерального питания растений на подзолистых почвах. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 280 с.
  10. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 168 с.
  11. Школьник М.Я. Микроэлементы в жизни растений. Л.: Наука, 1974. 323 с.
  12. Рак М.В., Пукалова Е.Н. Кобальт в почвах и растениеводческой продукции Беларуси и эффективность применения кобальтовых удобрений // Почвоведение и агрохимия. 2016. № 2 (57). С. 90–99.
  13. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М.: Госагропром СССР, ГУ ветеринарии, 1987. 5 с.
  14. Зырин Н.Г., Обухов А.И. Принципы и методы нормирования (стандартизации) содержания тяжелых металлов в почве и в системе почва–растение // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1983. Вып. 35. С. 7–11.
  15. Lock Koen, Janssen Colin R. Influence of aging on copper bioavailability in soil // Environ. Toxicol. Chem. 2003. V. 22. № 5. P. 1162–1266.
  16. Елькина Г.Я. Поведение меди в системе почва–растение в условиях европейского Северо-Востока // Агрохимия. 2008. № 6. С. 72–79.
  17. Елькина Г.Я. Поведение цинка в системе почва–растение в условиях Европейского северо-Востока // Агрохимия. 2009. № 11. С. 57–64.
  18. Елькина Г.Я. Поведение кадмия в системе почва–растение в условиях европейского Северо-Востока // Агрохимия. 2011. № 8. С. 89–94.
  19. Несговорова Н.П., Савельев В.Г., Иванцова Г.В. Возможности использования гвоздичных растений в индикации содержания тяжелых металлов в почве // Фундамент. исслед-я. 2014. № 5. С. 765–771.

## Cobalt in the Soil–Plant System on Podzolic Soils of the European North-East of Russia

G. Ya. Elkina

*Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Division, RAS  
ul. Kommunisticheskay 28, Syktyvkar 167982, Russia  
E-mail: elkina@ib.komisc.ru*

It was found that cobalt behavior in an artificially polluted soil–plant system depended on specific features of a particular crop, cobalt amount and after-effect duration. In low concentrations, cobalt had a stimulating effect on the growth and development of forage grasses; when the optimum was exceeded, inhibition and death of plants occurred. Translocation of cobalt in plants above maximal permissible level was observed with the direct introduction of element 32 mg Co/kg soil. Because of the significant increase in the mobility of element in contaminated soils is a need necessary to assess the level of contamination on the presence of mobile forms.

*Key words:* cobalt, soil–plant system, Northeaster Europe of Russia.

УДК 631.453:632.122.1

## ОЦЕНКА И НОРМИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

© 2021 г. И. О. Плеханова<sup>1</sup>, \*, О. А. Золотарева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения  
119992 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

\*E-mail: irinaoplekhanova@mail.ru

Поступила в редакцию 29.12.2020 г.

После доработки 03.02.2021 г.

Принята к публикации 10.04.2021 г.

Загрязнение серой лесной (Luvisols), чернозема выщелоченного (Chernozems Haplic) и каштановой (Castanozems) почв соединениями Pb, Zn и Cd вызвало снижение всхожести, биомассы и длины проростков горчицы белой, а также ингибирование дыхания исследованных почв. Наиболее токсичными для растений и микроорганизмов были соединения Cd и условия полиэлементного загрязнения. Наибольшая подвижность Pb, Zn и Cd отмечена при одновременном их поступлении в почвы, причем коэффициенты концентрации подвижных и кислоторастворимых соединений этих элементов были в 1.5–2.0 раза больше, чем при монометалльном загрязнении почв. Наиболее чувствительным показателем загрязнения почв являлось поступление тяжелых металлов в растения.

**Ключевые слова:** загрязнение, тяжелые металлы, подвижность соединений, фитотестирование, биотестирование, экотоксичность.

**DOI:** 10.31857/S0002188121070085

### ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим компонентом, регулирующим состояние окружающей среды, является почвенный покров. Под экологическим состоянием почв понимают ее способность обеспечивать устойчивое функционирование естественных и антропогенных экосистем. Таким образом, нормирование экологического состояния окружающей среды в целом должно основываться на оценке выполнения почвами основных биогеохимических функций [1, 2].

Существующая система гигиенической регламентации является единственной законодательно утвержденной базой данных для оценки и нормирования концентраций загрязняющих веществ в почвах. Недостатком этих нормативов является отсутствие учета почвенно-экологических и геохимических условий образования и функционирования почв [3–5].

Многие исследователи считают, что нормативы содержания тяжелых металлов (ТМ) должны разрабатываться согласно конкретной почвенно-экологической обстановке [3, 6, 7]. Эти соображения учтены, отчасти, при разработке ОДК ТМ для 3-х групп почв: песчаных и супесчаных, су-

глинистых и глинистых, близких к нейтральным и нейтральным суглинистым и глинистым почвам [8]. Отсутствие дифференциации нормативов по природно-климатическим зонам и видам хозяйственного использования ограничивает возможности объективной оценки уровней загрязнения почв. Целью экологического нормирования является разработка научно обоснованных критериев и норм предельно допустимых концентраций, охватывающих все виды вредных воздействий на окружающую среду и почвы различного хозяйственного назначения. Токсическое действие загрязняющих веществ зависит от конкретной биогеохимической обстановки, поскольку существует перенос этих веществ между всеми компонентами окружающей среды, включая почву, растения, почвенных животных, микроорганизмы и воздух.

Система ПДК, основанная на дифференцированном изучении аналитическими методами отдельных веществ, не всегда отвечает современным принципам системности в экологии и не может в полной мере обеспечить сохранение приемлемого уровня экологической безопасности. Очень часто в окружающую среду поступает

целый набор загрязняющих веществ, идентифицировать каждое из которых весьма затруднительно, т.к. может наблюдаться эффект синергического действия загрязняющих веществ. В этом случае необходимо привлекать методы биотестирования и изучать отклик биологических систем на нагрузку с помощью выявления и анализа зависимости “доза–эффект” [9–11].

Пределом допустимой концентрации загрязняющих веществ в почвах является тот уровень, при котором начинает изменяться количество и качество живого вещества, т.е. биологическая продукция [4]. Этот уровень загрязнения почвы прямо или косвенно влияет на контактирующие сопредельные среды, что необходимо учитывать при разработке показателей экологического нормирования для реальных почв.

В настоящее время не существует общепринятой и хорошо разработанной теории экологического нормирования. Вместе с тем в последние десятилетия трудами многих отечественных и зарубежных ученых сделан существенный вклад в разработку этой концепции: предложены различные критерии для оценки качества водных и наземных экосистем, которые базируются на биотической концепции контроля качества природной среды [4, 6, 9–13]. Следует отметить, что выбор критериев для оценки экологического состояния почв является ключевым, поскольку определяет качество среды обитания, оцениваемое по показателям жизнедеятельности биологических систем. Если выбранные показатели удовлетворяют установленным критериям, то уровень антропогенной нагрузки можно считать приемлемым (допустимым). Почвенные критерии должны рассматриваться в качестве основных оценочных критериев состояния экосистемы, поскольку они определяют состояние и функционирование растений, комплекса почвенных микроорганизмов и животных, а также качество природных вод. Эти критерии должны включать характеристику химических, физических и биологических свойств почв, определение форм соединений металлов в почвах, что необходимо для оценки их влияния на окружающую среду, а также устойчивость почв к загрязнению ТМ. Основным показателем устойчивости почв к различным химическим воздействиям должно быть ее эколого-геохимическое состояние, обеспечивающее нормальное функционирование присущих данной биогеоценотической системе совокупностей живых организмов и качество создаваемой биологической продукции [4]. Это уникальное свойство почв зависит от буферности почв, которая определяется такими химически-

ми, физическими и биологическими свойствами, как кислотность, гранулометрический и минералогический состав, содержание гумуса, состав обменных катионов и пр., которые определяют реакцию почв на загрязнение и возможность осуществления экологических функций [4, 5, 11].

Одним из интегральных показателей загрязнения почвы является ее фитотоксичность (свойство почвы подавлять рост и развитие высших растений). Этот показатель характеризует границу, определяющую изменение продуктивности экосистемы, что является одним из основных критериев качества почв.

Цель работы – оценка и нормирование экологического состояния серой лесной, чернозема выщелоченного и каштановой почв при искусственном загрязнении соединениями Zn, Pb, Cd при раздельном и совместном их поступлении в почвы по показателям состояния ТМ, микробиологической активности и фитотоксичности почв.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Были исследованы пробы из пахотных горизонтов почв: серой лесной (Тулская обл.), чернозема выщелоченного (Липецкая обл.) и каштановой (Волгоградская обл.). Гидролитическую кислотность, обменные соединения Ca и Mg определяли путем вытеснения их 1 н. раствором  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  [14]. Содержание органического вещества в образцах почв определяли по методу Тюрина в модификации Никитина со спектрофотометрическим окончанием, pH водной и солевой вытяжек – потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность – путем вытеснения 1 н. раствором  $\text{CH}_3\text{COONa}$  [14]. Основные химические свойства исследованных почв показаны в табл. 1.

Серая лесная почва и чернозем характеризовались нейтральной реакцией среды, каштановая почва – щелочной реакцией, что возможно было связано с некоторым засолением этой почвы. В градациях ОДК не учитывают содержание гумуса, однако следует отметить, что в каштановой почве содержание органического вещества было в 2 раза меньше, чем в серой лесной и почти в 2.7 раза меньше, чем в черноземе выщелоченном.

Валовое содержание ТМ в почвах определяли после разложения их царской водкой ( $\text{HCl} + \text{HNO}_3$  в соотношении 3 : 1) [15], подвижных фракций ТМ – в 1 н. азотнокислой и ацетатно-аммонийной вытяжках pH 4.8. Водную вытяжку готовили в соотношении почва : вода = 1 : 10. Определение содержания ТМ в вытяжках прово-

**Таблица 1.** Показатели агрохимических свойств почв опыта

| Почва                 | Гумус, % | рН <sub>KCl</sub> | рН <sub>H<sub>2</sub>O</sub> | Сумма обменных оснований | Гидролитическая кислотность |
|-----------------------|----------|-------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
|                       |          |                   |                              | ммоль экв/100 г почвы    |                             |
| Серая лесная          | 5.0      | 5.7               | 6.7                          | 15                       | 3.2                         |
| Чернозем выщелоченный | 6.8      | 5.9               | 6.8                          | 28                       | 3.0                         |
| Каштановая            | 2.5      | 6.8               | 7.7                          | 17                       | 1.3                         |

дили на атомно-абсорбционном спектрофотометре “AAS-3” в пламени ацетилен–воздух с использованием дейтериевого корректора фона и методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на приборе “Agilent ICP-MS 7100a”.

В соответствии с градациями ОДК исследованные почвы относятся к группе почв с нейтральной реакцией среды и суглинистым гранулометрическим составом, что определяет их близкую устойчивость к ТМ и одинаковые величины ОДК [4, 8, 16, 17] (табл. 2).

В почвы вносили водный раствор уксуснокислых солей ТМ из расчета следующих доз: 1 ОДК, 2 ОДК, 3 ОДК, 5 ОДК, 10 ОДК для Pb, Zn, Cd. Для варианта с комплексным загрязнением вносили одновременно раствор солей всех 3-х металлов в дозах от 1 до 10 ОДК. Соли уксусной кислоты были выбраны для опыта в связи с их хорошей растворимостью, что способствовало быстрому взаимодействию с почвенными компонентами, гидролиз этих солей не сопровождался резким сдвигом рН в область кислой реакции среды. Ацетат-ионы являются естественным продуктом метаболизма растений и незначительно изменяют питательный режим почв.

Почву инкубировали в течение 14 сут после внесения загрязняющего вещества при влажности 60% ПВ. Затем высаживали семена горчицы и семена овса по 30 шт./сосуд массой 500 граммов для определения уровня фитотоксичности почв и транслокационного показателя. Продолжительность вегетационных опытов составляла 40 сут. Опыты проводили в трехкратной повторности.

Для изучения динамики развития тест-культур определяли всхожесть семян, энергию прорастания, длину корней и проростков. Уровень фитотоксичности почв отмечали при концентрации ТМ, вызывающей подавление роста и развития растений на 20% от контроля.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Валовое содержание элементов в незагрязненных почвах находилось в пределах типичных изменений содержания микроэлементов (табл. 3) [7, 18].

Валовое содержание ТМ определяют для оценки уровней загрязнения почв с целью сравнения с фоновым, эталонным содержанием или с ПДК [4, 7, 19]. Содержание подвижных соединений определяли в ацетатно-аммонийной вытяжке из почв, тем более что ряд ПДК разработан только для подвижных соединений, которые извлекают ацетатно-аммонийным буфером рН 4.8. Эту вытяжку широко используют в агрохимии для определения доступных для растений соединений микроэлементов и ТМ. По мнению многих исследователей, степень загрязнения почв ТМ правильнее оценивать по содержанию их наиболее подвижных и доступных растениям форм [6, 7, 20]. По величине валового содержания ТМ в почве не всегда можно судить об экологической ситуации и влиянии загрязняющих веществ на растения. Если содержание ТМ превышает фоновый уровень в 2–3 раза, такие почвы не всегда можно отнести к загрязненным. Влияние на компоненты природной среды зависит от исходного содержания ТМ, которое может быть низким, и тогда это влияние может дать положительный эффект, или повышенным, и тогда могут возникать негативные последствия для живых организмов и качества сопредельных сред. Кроме этого, реакция почвы на загрязнение сильно зависит от свойств почвы и загрязняющих веществ. В процессе жизнедеятельности растения контактируют

**Таблица 2.** Уровни ОДК и дозы ТМ, внесенные в почвы, мг/кг

| ТМ | Дозы ТМ, кратные ОДК |     |     |      |      |
|----|----------------------|-----|-----|------|------|
|    | 1                    | 2   | 3   | 5    | 10   |
| Pb | 130                  | 260 | 390 | 650  | 1300 |
| Zn | 220                  | 440 | 660 | 1100 | 2200 |
| Cd | 2                    | 4   | 6   | 10   | 20   |

**Таблица 3.** Валовое содержание ТМ в почвах опыта (мг/кг) и коэффициент концентрации ТМ ( $K_c$ ) относительно контроля

| Серая лесная почва    |      |       |      |       |      |       |
|-----------------------|------|-------|------|-------|------|-------|
| Вариант               | Zn   | $K_c$ | Pb   | $K_c$ | Cd   | $K_c$ |
| Контроль              | 47.5 | 1     | 10.5 | 1     | 0.2  | 1     |
| 1 ОДК                 | 268  | 5.6   | 141  | 13.4  | 2.2  | 11    |
| 2 ОДК                 | 488  | 10.3  | 271  | 25.8  | 4.2  | 21    |
| 3 ОДК                 | 708  | 14.9  | 401  | 38.1  | 6.2  | 31    |
| 5 ОДК                 | 1150 | 24.2  | 661  | 62.9  | 10.2 | 51    |
| 10 ОДК                | 2250 | 47.3  | 1310 | 125   | 20.2 | 101   |
| Чернозем выщелоченный |      |       |      |       |      |       |
| Контроль              | 71   | 1     | 25.7 | 1     | 0.28 | 1     |
| 1 ОДК                 | 291  | 4.1   | 156  | 6     | 2.28 | 8.1   |
| 2 ОДК                 | 511  | 7.2   | 286  | 11.1  | 4.28 | 15.3  |
| 3 ОДК                 | 731  | 10.3  | 416  | 16.2  | 6.28 | 22.4  |
| 5 ОДК                 | 1171 | 16.5  | 676  | 26.3  | 10.3 | 36.7  |
| 10 ОДК                | 2271 | 32    | 2230 | 86.6  | 20.3 | 72.4  |
| Каштановая почва      |      |       |      |       |      |       |
| Контроль              | 48.8 | 1     | 15.5 | 1     | 0.13 | 1     |
| 1 ОДК                 | 267  | 5.5   | 146  | 9.4   | 2.13 | 16.4  |
| 2 ОДК                 | 487  | 9.9   | 276  | 17.8  | 4.13 | 31.8  |
| 3 ОДК                 | 707  | 14.5  | 406  | 26.2  | 6.13 | 47.1  |
| 5 ОДК                 | 1150 | 23.5  | 666  | 42.9  | 10.1 | 77.9  |
| 10 ОДК                | 2250 | 46    | 1320 | 84.9  | 20.1 | 155   |

в основном с доступными соединениями ТМ, количество которых, в свою очередь, тесно связано с буферностью почв, которая определяется кислотностью почв, содержанием органического вещества, составом обменных катионов и анионов, а также гранулометрическим и минералогическим составом почв [6].

При внесении в серую лесную почву Zn, Pb и Cd в дозе, равной 1 ОДК, их содержание относительно фона увеличилось в 5, 13 и 11 раз соответственно, т.е. допустимые концентрации перечисленных элементов превышали фоновое содержание в 5–11 раз. При искусственном загрязнении почв соединениями Pb, Zn и Cd увеличивалось не только общее содержание этих металлов в почвах, но изменялось соотношение между формами соединений. Например, при внесении максимальной дозы Zn его общее содержание увеличилось в 47 раз, а содержание подвижных соединений увеличилось в 660 раз по сравнению с контролем (табл. 4). Значительно увеличилась подвижность соединений Pb, Zn и Cd в почвах при загрязнении, но наибольшие изменения произошли при комплексном загрязнении почв 3-мя металлами

одновременно. Вероятно, это связано с увеличением конкуренции ионов металлов за реакционные центры. И использованные экстрагенты не являются селективными, что не позволило судить о преимущественном поглощении ТМ определенными компонентами почв. Однако способность соединений Pb к образованию прочных комплексных соединений с органическими соединениями позволила предположить, что именно эти позиции в большей степени были заняты ионами Pb [7, 15, 20, 21].

Сравнение содержания подвижных соединений ТМ с ПДК показало, что при уровне загрязнения 1 ОДК количество подвижных соединений ТМ превышало этот показатель в 2.5–5.0 раза. ОДК для валового содержания элементов разработаны с учетом почвенных свойств и логично было ожидать, что при валовом содержании 1 ОДК ТМ, содержание подвижных соединений будет равным 1 ПДК. Несоответствие этих показателей для всех ТМ в исследованных почвах свидетельствовало о том, что и для подвижных соединений ТМ нормативное содержание зависит от свойств почв. Известно, что токсичность ТМ непосредственно связана с их биологической доступностью почвенным организмам, которая определяется пулом загрязняющих веществ, способных переходить в почвенный раствор. Корневая система растений способна усваивать не только растворимые в воде соединения, но и более прочно связанные, как за счет растворения их корневыми выделениями растений [22], так и в результате адсорбции и избирательного поглощения клеточными стенками [23].

С ростом дозы загрязняющего вещества для всех почв отмечено увеличение подвижности соединений элементов, входящих в его состав, а также доля от их валового содержания и, следовательно, росла опасность загрязнения почв и сопредельных сред. Причем соединения Zn и Cd в исследованных почвах были более подвижными, чем соединения Pb, что вероятно связано с их более низким сродством к органическому веществу и более высокой растворимостью их соединений. Несмотря на низкое содержание в почве, доля Cd, переходящего в вытяжку ААБ, была больше, чем Zn и Pb. С увеличением уровня загрязнения содержание подвижных форм Cd быстро возрастало.

Следует отметить, что наибольшая подвижность Pb, Zn и Cd отмечена при комплексном загрязнении почв ТМ. Этот факт следует учитывать, т.к. на практике чаще всего наблюдается полиэлементное загрязнение почв как в случае промышленного, так и транспортного загрязнения.

**Таблица 4.** Изменение содержания кислоторастворимых и подвижных соединений ТМ в почвах опыта и коэффициента концентрации ТМ ( $K_c$ ) относительно контроля

| Серая лесная почва         |          |       |                       |       |         |       |                       |       |         |                       |       |
|----------------------------|----------|-------|-----------------------|-------|---------|-------|-----------------------|-------|---------|-----------------------|-------|
| Вариант                    | Zn       |       |                       |       | Pb      |       |                       |       | Cd      |                       |       |
|                            | ААБ      | $K_c$ | 1 н. HNO <sub>3</sub> | $K_c$ | ААБ     | $K_c$ | 1 н. HNO <sub>3</sub> | $K_c$ | ААБ     | 1 н. HNO <sub>3</sub> | $K_c$ |
| Контроль                   | 1.7/3.3  | 1     | 6.8/14                | 1     | 1/9     | 1     | 3/27                  | 1     | 0.02    | 0.022/11              | 1     |
| 1 ОДК                      | 64/24    | 37.6  | 105/39                | 21.3  | 29/20   | 29    | 55/39                 | 18.3  | 0.5/23  | 0.6/27                | 27    |
| 2 ОДК                      | 145/30   | 85.3  | 200/41                | 29.4  | 54/20   | 54    | 114/42                | 38    | 1/24    | 1.2/29                | 54.5  |
| 3 ОДК                      | 288/41   | 169   | 327/47                | 48.1  | 125/31  | 125   | 200/50                | 66.7  | 2/32    | 2.4/39                | 109   |
| 5 ОДК                      | 490/43   | 288   | 591/52                | 86.9  | 195/30  | 195   | 330/50                | 110   | 3.4/33  | 5/49                  | 227   |
| 10 ОДК                     | 1130/51  | 667   | 1750/78               | 257   | 650/49  | 650   | 801/61                | 267   | 9.2/46  | 13/64                 | 591   |
| Полиэлементное загрязнение |          |       |                       |       |         |       |                       |       |         |                       |       |
| 1 ОДК                      | 75/28    | 44.1  | 141/53                | 20.7  | 34/24   | 34    | 69/49                 | 23    | 0.6/27  | 1.1/45                | 50    |
| 2 ОДК                      | 186/38   | 109   | 277/57                | 40.7  | 81/30   | 81    | 109/40                | 36.3  | 1.4/33  | 2.3/54                | 104   |
| 3 ОДК                      | 301/43   | 177   | 422/60                | 62    | 148/37  | 148   | 198/50                | 66    | 2.2/35  | 3.4/55                | 154   |
| 5 ОДК                      | 529/46   | 311   | 723/63                | 106   | 244/37  | 244   | 357/54                | 119   | 4/39    | 5.8/57                | 264   |
| 10 ОДК                     | 1490/66  | 876   | 1790/80               | 263   | 765/58  | 765   | 911/70                | 304   | 13.1/64 | 17/84                 | 773   |
| Чернозем выщелоченный      |          |       |                       |       |         |       |                       |       |         |                       |       |
| Вариант                    | Zn       |       |                       |       | Pb      |       |                       |       | Cd      |                       |       |
|                            | ААБ      | $K_c$ | 1 н. HNO <sub>3</sub> | $K_c$ | ААБ     | $K_c$ | 1 н. HNO <sub>3</sub> | $K_c$ | ААБ     | 1 н. HNO <sub>3</sub> | $K_c$ |
| Контроль                   | 1.2/ 2.1 | 1     | 6.2/11                | 1     | 0.5/1.9 | 1     | 3/12                  | 1     | 0.01    | 0.012/4               | 1     |
| 1 ОДК                      | 111/38   | 92.5  | 138/47                | 22.2  | 15/10   | 30    | 38/24                 | 12.7  | 0.8/35  | 1/44                  | 66.7  |
| 2 ОДК                      | 224/44   | 187   | 245/48                | 39.5  | 65/23   | 130   | 97/34                 | 32.3  | 1.6/37  | 2/47                  | 167   |
| 3 ОДК                      | 357/49   | 298   | 397/54                | 64    | 108/26  | 216   | 165/40                | 55    | 2.4/38  | 3/48                  | 250   |
| 5 ОДК                      | 612/52   | 510   | 645/55                | 104   | 203/30  | 406   | 313/46                | 104   | 4.1/40  | 4.9/48                | 408   |
| 10 ОДК                     | 1510/66  | 1260  | 1650/73               | 266   | 499/38  | 998   | 699/53                | 233   | 11/54   | 14.9/73               | 1240  |
| Полиэлементное загрязнение |          |       |                       |       |         |       |                       |       |         |                       |       |
| 1 ОДК                      | 114/39   | 95    | 148/ 51               | 23.9  | 40/ 26  | 80    | 72/ 46                | 24    | 0.9/39  | 1.2/52                | 100   |
| 2 ОДК                      | 253/49   | 211   | 294/57                | 47.4  | 100/35  | 200   | 147/51                | 49    | 1.8/42  | 2.6/60                | 217   |
| 3 ОДК                      | 391/53   | 326   | 434/59                | 70    | 156/37  | 312   | 218/52                | 72.7  | 2.8/45  | 3.9/62                | 325   |
| 5 ОДК                      | 662/56   | 552   | 724/ 62               | 122   | 279/41  | 558   | 360/ 53               | 120   | 4.8/ 47 | 6.5/63                | 542   |
| 10 ОДК                     | 1750/77  | 1460  | 1840/81               | 296   | 669/50  | 1340  | 810/ 61               | 270   | 15.8/78 | 17.6/87               | 1470  |
| Каштановая почва           |          |       |                       |       |         |       |                       |       |         |                       |       |
| Вариант                    | Zn       |       |                       |       | Pb      |       |                       |       | Cd      |                       |       |
|                            | ААБ      | $K_c$ | 1 н. HNO <sub>3</sub> | $K_c$ | ААБ     | $K_c$ | 1 н. HNO <sub>3</sub> | $K_c$ | ААБ     | 1 н. HNO <sub>3</sub> | $K_c$ |
| Контроль                   | 1.4/3    | 1     | 8.3/17                | 1     | 0.6/4   | 1     | 2.5/18                | 1     | 0.009   | 0.02/15               | 1     |
| 1 ОДК                      | 124/46   | 88.6  | 148/55                | 17.8  | 30/21   | 50    | 59/41                 | 23.6  | 0.7/33  | 1.2/56                | 60    |
| 2 ОДК                      | 257/53   | 183.6 | 301/62                | 36.3  | 85/31   | 142   | 167/61                | 66.8  | 2.1/51  | 2.7/65                | 135   |
| 3 ОДК                      | 411/58   | 294   | 519/73                | 62.5  | 210/52  | 350   | 257/64                | 103   | 3.7/60  | 4.3/70                | 215   |
| 5 ОДК                      | 716/62   | 511   | 950/83                | 115   | 368/55  | 613   | 451/68                | 180   | 6.9/67  | 7.3/72                | 365   |
| 10 ОДК                     | 1840/82  | 1310  | 2010/90               | 242   | 824/63  | 1370  | 909/69                | 363   | 15/74   | 15.4/76               | 770   |
| Полиэлементное загрязнение |          |       |                       |       |         |       |                       |       |         |                       |       |
| 1 ОДК                      | 181/67   | 129   | 211/79                | 25.4  | 88/47   | 146   | 94/65                 | 37.6  | 1.1/52  | 1.4/66                | 70    |
| 2 ОДК                      | 329/68   | 235   | 382/78                | 46    | 155/56  | 258   | 184/67                | 73.6  | 2.5/60  | 3/73                  | 150   |
| 3 ОДК                      | 529/75   | 378   | 561/79                | 67.6  | 256/63  | 427   | 284/70                | 114   | 4/65    | 4.8/78                | 240   |
| 5 ОДК                      | 900/78   | 643   | 928/81                | 112   | 441/66  | 735   | 482/72                | 193   | 7.3/72  | 8.1/80                | 405   |
| 10 ОДК                     | 1890/84  | 1350  | 2050/91               | 247   | 956/73  | 1590  | 1020/78               | 409   | 16.2/80 | 18/89                 | 900   |
| ПДК                        | 23       |       |                       |       | 6       |       |                       |       | —       |                       |       |
| подв. соед.                |          |       |                       |       |         |       |                       |       |         |                       |       |

Примечание. Над чертой — мг/кг воздушно-сухой почвы, под чертой — % от валового содержания.

Для ландшафтно-геохимической оценки загрязнения почв используют коэффициент аномалии — отношение среднего содержания металла в загрязненной почве к его фоновому содержанию или местному геохимическому фону [1, 4, 24]. Эти коэффициенты ( $K_c$ ) были рассчитаны для валового содержания (табл. 3), подвижных и кислоторастворимых соединений в загрязненных почвах (табл. 4). Полученные показатели чрезвычайно контрастно отражали различия между загрязненными и незагрязненными почвами. При дозе, равной 1 ОДК, валовое содержание Zn в дерново-подзолистой почве увеличилось в 2.9 раза, а содержание подвижных и кислоторастворимых соединений возросло в 13.7 и 15.5 раза соответственно. Еще более значительное увеличение подвижности металлов наблюдали с ростом уровня загрязнения почв. Кроме этого, при полиэлементном загрязнении почв коэффициенты концентрации подвижных и кислоторастворимых соединений ТМ были больше в 1.5–2.0 раза, чем при монометалльном загрязнении почв (табл. 4).

Таким образом, при загрязнении почв отмечали резкое увеличение подвижности ТМ, которое является чувствительным диагностическим признаком загрязнения почв. Это подтверждено сравнением величин коэффициентов концентрации металлов для валового содержания и для подвижных соединений. Масштабы изменения подвижности элементов были различными, что приводило к изменению соотношения между количеством отдельных элементов как в твердой, так и в жидкой фазе почв. Такая перестройка состояния ТМ несомненно приводила к изменению их поглощения растениями. Следует отметить, что при полиэлементном загрязнении разница между содержанием подвижных соединений в загрязненных и незагрязненных почвах значительно возрастала.

Для оценки уровня загрязнения почв используют разные показатели: один из них — доля подвижных соединений от валового содержания. Для фоновых почв эта доля составляла 2–10%, при уровне загрязнения, равном 1 ОДК, — 15–30%, при комплексном загрязнении этот показатель увеличивался до 30–40%. При дозе ТМ, равной 10 ОДК, в группу подвижных соединений переходило от 50 до 70% от валового содержания. С увеличением уровня загрязнения увеличивалась и доля кислоторастворимых соединений, которая достигала 70–90% при максимальном уровне загрязнения, что позволило использовать кислотную вытяжку из сильно загрязненных почв для характеристики общего содержания ТМ.

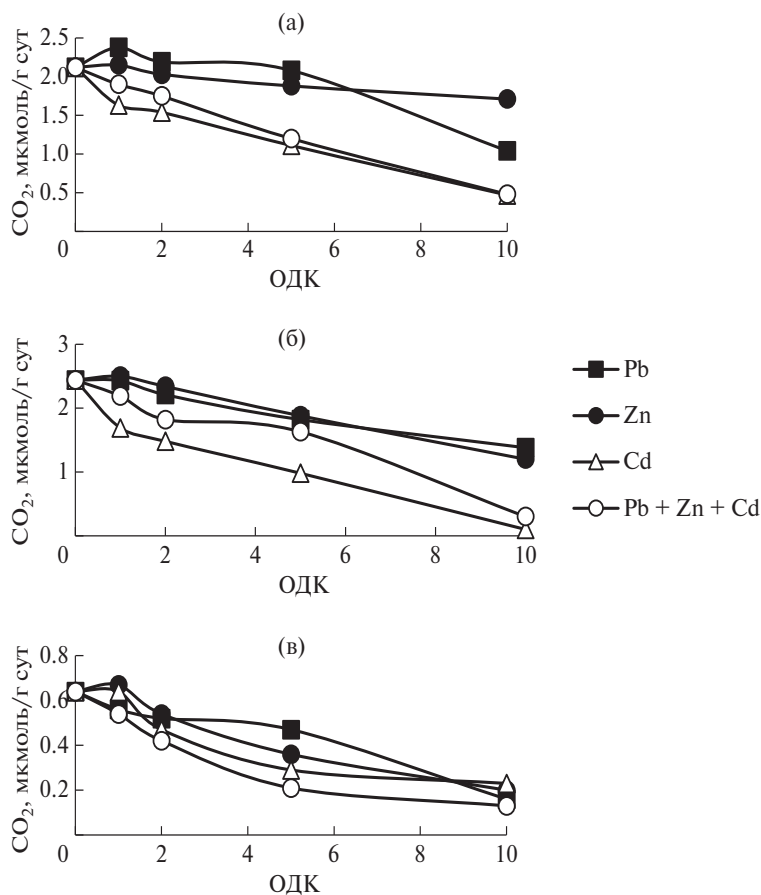
Несмотря на то, что показатели химического состояния почв чутко реагируют на загрязнение, основным критерием для экологического нормирования является реакция биологических систем на загрязнение. Определение концентраций загрязняющих веществ, которые не нарушают основные экологические функции почв, является основой для разработки критериев качества почв [9, 10, 12, 25]. Таким образом, для разработки критериев качества почв необходим системный подход, обеспечивающий уровень безопасного воздействия на живые организмы и качество сопредельных сред.

Оценка биологической активности незагрязненных почв по показателю базального дыхания показала, что для серой лесной почвы эмиссия  $\text{CO}_2$  составила 2.1, для чернозема выщелоченного — 2.6, для каштановой почвы — 0.7 мкмоль/г/сут. Вероятно, это объясняется невысоким содержанием органического вещества и менее благоприятными физико-химическими свойствами каштановой почвы.

Внесение в почвы ТМ в дозе 1 ОДК вызвало небольшое увеличение интенсивности дыхания при загрязнении почв Zn, а при загрязнении Cd и смесью металлов наблюдали тенденцию к снижению активности дыхания. При увеличении уровней загрязнения было отмечено постепенное снижение интенсивности дыхания почв, которое было выражено сильнее при загрязнении почв соединениями Cd и при полиэлементном загрязнении.

При внесении ТМ в дозе 5 ОДК произошло заметное снижение интенсивности дыхания во всех вариантах опыта. Для серой лесной почвы, загрязненной соединениями Zn и Pb, интенсивность дыхания снизилась на 25%, а при таком же уровне загрязнения этой почвы Cd и смесью металлов — на 50% (рис. 1). Следует отметить более высокую токсичность соединений Cd и смеси металлов для всех почв. Таким образом, при уровне загрязнения, равном 5 ОДК, отмечено значительное угнетение микробиологической активности почв. При концентрации загрязняющих веществ, равной 10 ОДК, интенсивность почвенного дыхания была минимальной. Наибольшее снижение — до 80% — наблюдали при загрязнении почв соединениями Cd и комплексном загрязнении. Большой устойчивостью к загрязнению ТМ обладали чернозем и серая лесная почва, наименьшей — каштановая. Почвенное дыхание является чувствительным и информативным показателем функционального состояния почв, что показано во многих публикациях [26, 27].





**Рис. 1.** Интенсивность эмиссии  $\text{CO}_2$  при различном содержании ТМ: (а) — в серой лесной почве, (б) — в черноземе выщелоченном, (в) — в каштановой почве.

Фитотестирование часто используют в природоохранной практике для оценки экологического состояния природных сред [28]. Этот показатель характеризует границу, определяющую изменение продуктивности экосистемы, что является существенным для экологической оценки почв. По наблюдениям многих авторов, уровень фитотоксичности почв отмечается при более высоких концентрациях ТМ, чем величина ПДК [7, 17]. За минимальный уровень фитотоксичности почв обычно принимают такое загрязнение, при котором урожайность сельскохозяйственных культур снижается на 20%.

Результаты вегетационных опытов показали, что концентрации ТМ, оказавшие достоверное негативное воздействие на растения, выявлены при разных уровнях загрязнения для серой лесной почвы, чернозема выщелоченного и каштановой почвы. Различия проявились в количестве проросших семян, высоте растений и энергии прорастания. Максимальная всхожесть семян горчицы белой отмечена на черноземе выщело-

ченном, меньше — на серой лесной почве, еще меньше — на каштановой почве, что видимо отражало естественное плодородие и различную буферную способность изученных почв (рис. 2).

При загрязнении Zn серой лесной почвы в дозах 1 и 2 ОДК культура росла хорошо, всхожесть была близка к контролю, признаков угнетения не наблюдали на протяжении всего периода эксперимента. При уровне загрязнения 3 ОДК количество проростков тест-культуры было меньше чем в контроле всего на 20%. При концентрации Zn, равной 5 ОДК, отмечали резкое снижение всхожести семян — более чем на 50% по сравнению с контролем. Культура обладала небольшой энергией прорастания и к концу срока опыта наблюдали почти полное ингибирование роста горчицы. При максимальном уровне загрязнения (10 ОДК) количество проростков было на 74% меньше, чем в контроле. Проростки были ослабленными, отмечали замедление роста растений в высоту и к концу опыта наблюдали их гибель.

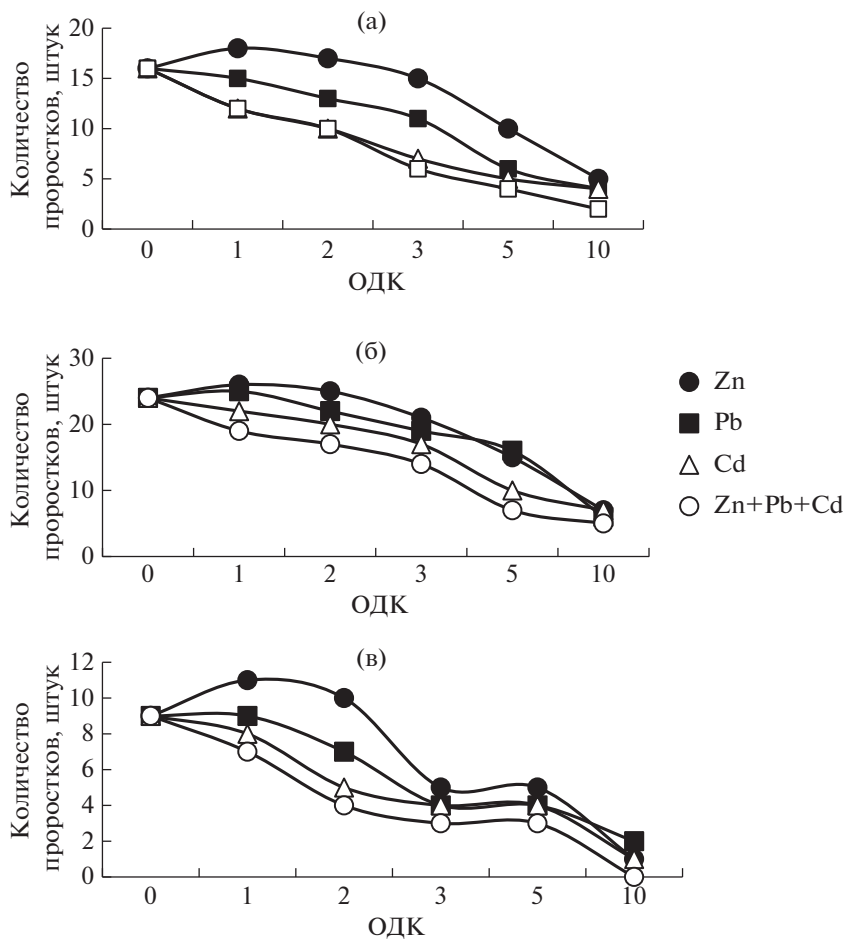


Рис. 2. Всхожесть *Sinapis alba* на почвах: (а) — серой лесной почве, (б) — черноземе выщелоченном, (в) — каштановой почве.

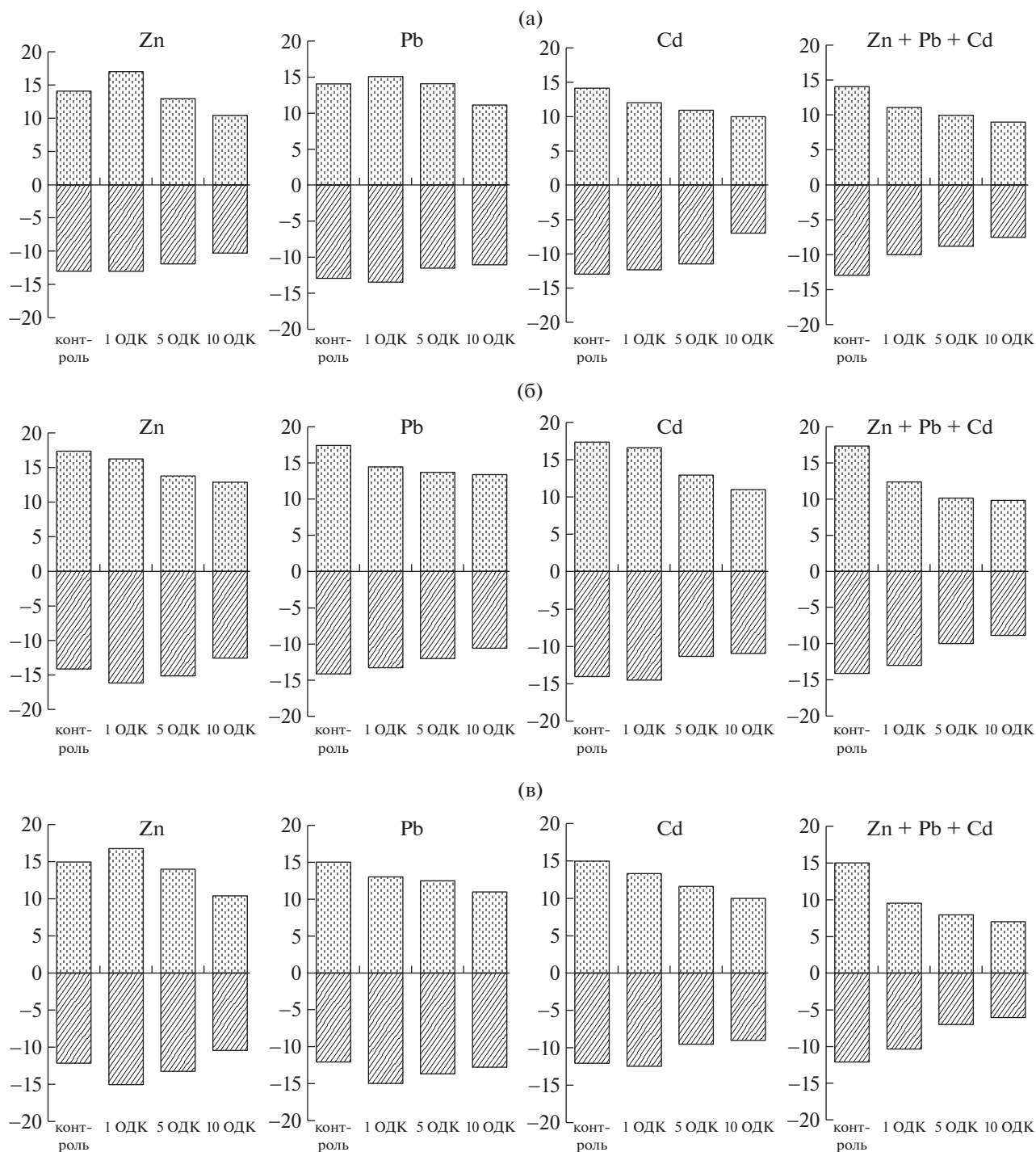
При загрязнении почв Pb в дозах 1 и 2 ОДК признаков угнетения не наблюдали. Однако всхожесть и энергия прорастания были несколько меньше, чем в контроле. При дозе 3 ОДК всхожесть была меньше контроля на 40%. При более высоких концентрациях свинца (5 и 10 ОДК) растения имели угнетенный вид и небольшую биомассу. Количество проростков было меньше на 75%, чем в контроле.

На серой лесной почве тест-культура отличалась довольно высокой всхожестью и энергией прорастания. Отмечено незначительное стимулирование роста растений при загрязнении почвы в дозах 1 и 2 ОДК Pb и Zn, признаков угнетения тест-культуры не было отмечено в течение всего опыта. При загрязнении почвы, равном 3 ОДК Pb и Zn, отмечено снижение всхожести растений, а на 30-е сут количество жизнеспособных проростков начало сокращаться.

Наибольший токсический эффект был отмечен при загрязнении почв Cd и смесью металлов.

При дозе, равной 2 ОДК, отмечено снижение всхожести на 32% и 41% соответственно по сравнению с контролем. При 5 ОДК наблюдали сильное подавление роста растений и уменьшение всхожести семян, более чем в 2 раза при всех типах загрязнения.

Таким образом, для исследованных почв были определены критические уровни загрязнения, оказывающие негативное воздействие на всхожесть и нормальное функционирование растений горчицы белой при разных видах загрязнения. Длина корней и проростков горчицы является чувствительным показателем загрязнения почв ТМ. Даже при дозе 1 ОДК наблюдали некоторое снижение длины проростков, а при дозах 3–5 ОДК отмечали резкое угнетение тест-культуры. При загрязнении почв Cd отмечали пожелтение надземной части растений и уменьшение длины корней (рис. 3). Следует отметить, что Cd является наиболее токсичным элементом, который оказывает максимальное угнетающее действие на



**Рис. 3.** Длина корней и проростков овса: (а) — на серой лесной почве, (б) — на черноземе выщелоченном, (в) — на каштановой почве.

растения. Загрязнение почв Zn или Pb менее токсично влияет на тест-культуру, чем загрязнение Cd или смесью ТМ. Невысокая фитотоксичность Pb возможно связана с наличием действующей в растении системы инактивации элемента, проникающего в корневую систему. Основная часть

свинца задерживается в корнях растений, как показано в работах [7, 17].

Важнейшей характеристикой качества растительной продукции является содержание ТМ в биомассе (рис. 4). Поступление ТМ в растения зависит от свойств почв, содержания подвижных

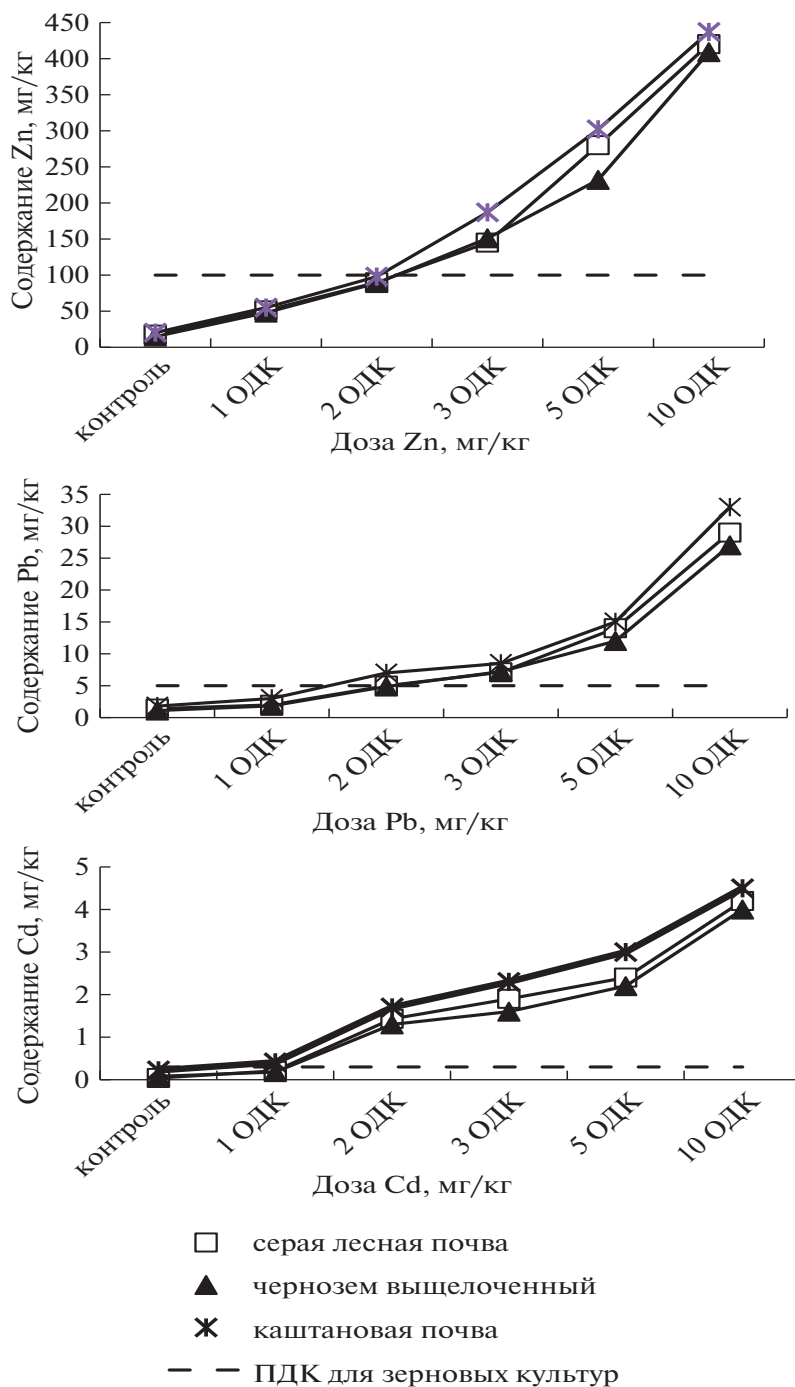


Рис. 4. Накопление ТМ в зеленой массе проростков овса.

соединений металлов и физиологических особенностей растений [7, 17, 29]. Между содержанием металлов в почвах и поглощением их корнями растений существует определенная зависимость [30]. Содержание Zn и Pb в зеленой массе овса достигло ПДК при дозе этих элементов в почвах равной 2 ОДК. Вероятно, это явление связано с достаточно строгими нормативами содержания

этих элементов в почвах. При загрязнении почв кадмием содержание этого элемента в зеленой массе овса достигло ПДК для растений при дозе 1 ОДК. Таким образом, поглощение ТМ растениями является наиболее чувствительным показателем загрязнения почв и проявляется при дозе 1–2 ОДК ТМ в почве. Показатели функционирования растений и почвенных микроорганизмов дают раз-

Таблица 5. Биологические показатели экотоксичности почв, загрязненных ТМ

| Почва                    | Показатели экотоксичности почв                         |    |    |     |                                              |    |    |     | Микробиологический показатель |    |    |     |
|--------------------------|--------------------------------------------------------|----|----|-----|----------------------------------------------|----|----|-----|-------------------------------|----|----|-----|
|                          | уменьшение длины проростков/корней <i>Sinapis alba</i> |    |    |     | снижение всхожести семян <i>Sinapis alba</i> |    |    |     | эмиссия CO <sub>2</sub>       |    |    |     |
|                          | критерий                                               |    |    |     |                                              |    |    |     |                               |    |    |     |
|                          | 20% от контроля                                        |    |    |     |                                              |    |    |     | 25% от контроля               |    |    |     |
|                          | Pb                                                     | Zn | Cd | ΣТМ | Pb                                           | Zn | Cd | ΣТМ | Pb                            | Zn | Cd | ΣТМ |
|                          | дозы тяжелых металлов, кратные ОДК                     |    |    |     |                                              |    |    |     |                               |    |    |     |
| Серая лесная             | 2                                                      | 2  | 1  | 1   | 3                                            | 3  | 2  | 2   | 4                             | 4  | 3  | 3   |
| Чернозем<br>выщелоченный | 2                                                      | 2  | 1  | 1   | 3                                            | 3  | 2  | 2   | 4                             | 4  | 3  | 3   |
| Каштановая               | 2                                                      | 2  | 1  | 1   | 3                                            | 3  | 2  | 2   | 3                             | 3  | 3  | 3   |

личные границы экотоксичности почв, загрязненных ТМ. Снижение всхожести *Sinapis alba* при загрязнении почв Pb или Zn отмечали при дозах этих металлов равных 3 ОДК, а при загрязнении почв Cd или смесью металлов – при дозах 2 ОДК. Угнетение почвенного дыхания было отмечено при более высоком уровне загрязнения почв (табл. 5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При загрязнении почв тяжелыми металлами (ТМ) отмечали резкое увеличение их подвижности, которое было наиболее чувствительным диагностическим признаком загрязнения почв. Это подтверждено сравнением величин коэффициентов концентрации металлов для валового содержания и для подвижных соединений. Масштабы изменения подвижности элементов были различными, что приводило к изменению соотношения между количеством отдельных элементов как в твердой, так и в жидкой фазе почв. Следует отметить, что при полиэлементном загрязнении разница между содержанием подвижных соединений в загрязненных и незагрязненных почвах значительно возросла. Этот факт следует учитывать, т.к. на практике чаще всего наблюдают полиэлементное загрязнение почв как в случае промышленного, так и транспортного загрязнения.

Для оценки загрязнения почв используют коэффициент концентрации – отношение среднего содержания металла в загрязненной почве к его фоновому содержанию или местному геохимическому фону. Эти коэффициенты чрезвычайно контрастно отражали различия между загрязненными и незагрязненными почвами. При полиэлементном загрязнении почв коэффициенты концентрации подвижных и кислоторастворимых соединений ТМ были в 1.5–2.0 раза больше, чем при монометалльным загрязнением почв.

Основным критерием для экологического нормирования является реакция биологических систем на загрязнение. Определение концентраций загрязняющих веществ, которые не нарушают основные экологические функции почв, является основой для разработки критериев их качества.

Концентрации тяжелых металлов, способные оказывать достоверное негативное воздействие на растения и почвенную микробиоту, выявлены при разных уровнях загрязнения для серой лесной, чернозема выщелоченного и каштановой почв. Результаты исследования показали, что токсичность соединений ТМ в значительной степени зависела как от свойств почвы, так и от чувствительности тест-культур, что необходимо учитывать при разработке любых нормативных показателей.

Показатели функционирования растений и почвенных микроорганизмов дали различные границы экотоксичности почв, загрязненных ТМ. Ингибирование дыхания исследованных почв наблюдали при более высоких дозах ТМ, чем снижение всхожести и длины проростков горчицы белой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский В.В. Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова // Почвоведение. 1999. № 3. С. 639–645.
2. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Изд-во МГУ, 2012. 410 с.
3. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. 2012. № 3. С. 368–375.
4. Глазовская М.А. Методологические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям: Метод. пособ. М.: Изд-во МГУ, 1997. 102 с.
5. Ильин В.Б. О нормировании тяжелых металлов в почве // Почвоведение. № 9. 1986. С. 90–98.

6. Ильин В.Б. Буферные свойства почвы и допустимый уровень ее загрязнения тяжелыми металлами // Агрохимия. 1997. № 11. С. 65–70.
7. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах растений. М.: Мир, 1989. 439 с.
8. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2042-06. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. 2006.
9. Булгаков Н.Г. Индикация состояния природных экосистем и нормирование факторов окружающей среды. Обзор существующих подходов // Усп. совр. биол. 2002. Т. 122. № 2. С. 115–135.
10. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений. Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
11. Яковлев А.С., Евдокимова М.В. Экологическое нормирование качества почв и управление их качеством // Почвоведение. 2011. № 5. С. 582–596.
12. Coleman D.C. From peds to paradoxes: linkages between soil biota and their influences on ecological processes // Soil Biol Biochem. 2008. V. 40. P. 271–289.
13. Wang M., Markert B., Shen W., Peng C., Ouyang Z. Microbiol biomass carbon and enzyme activities of urban soils in Beijing // Environ. Sci. Pollut. Res. 2011. V. 18 (6). P. 958–967.
14. Агрохимические методы исследования почв / Под ред. Соколова А.В. М., 1975. 436 с.
15. Плеханова И.О., Бамбушева В.А. Экстракционные методы изучения состояния тяжелых металлов в почвах и их сравнительная оценка // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1081–1088.
16. ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. 2011.
17. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
18. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 237 с.
19. Сан ПиН 4266–87. Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами.
20. Манджиева С.С., Минкина Т.М., Мотузова Г.Н., Головатый С.Е., Мирошниченко Н.Н., Лукашенко Н.К., Фатеев А.И. Фракционно-групповой состав соединений цинка и свинца как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. 2014. № 5. С. 632–640.
21. Плеханова И.О. Влияние условий увлажнения на фракционный состав соединений тяжелых металлов в агродерново-подзолистых почвах, загрязненных осадком сточных вод // Почвоведение. 2012. № 7. С. 735–743.
22. Соколова Т.А. Специфика свойств почв в ризосфере: Анализ литературы // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1097–1111.
23. Meychik N.R., Yermakov I.P. Exchange properties of plant root cell walls // Plant and Soil. 2001. V. 234. № 2. P. 181–193.
24. Саен Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
25. Adriano D.C. Trace elements in the terrestrial environment. N.Y.: Springer-Verlag, 1986. 533 p.
26. Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., Васенев В.И., Кудяров В.Н., Валентини Р. Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1077–1088.
27. Schlesinger W.H., Andrews J.A. Soil respiration and global carbon cycle // Biogeochemistry. 2000. V. 48. P. 7–20.
28. Карпунин А.И., Бушуев Н.Н. Влияние применения удобрений на содержание тяжелых металлов в почвах длительных полевых опытов // Агрохимия. 2007. № 5. С. 76–84.
29. Плеханова И.О., Кутукова Ю.Д., Обухов А.И. Накопление тяжелых металлов растениями при загрязнении почв осадком сточных вод // Почвоведение. 1995. № 12. С. 1530–1536.
30. Водяницкий Ю.Н., Плеханова И.О. Биогеохимия тяжелых металлов в загрязненных переувлажненных почвах (аналитический обзор) // Почвоведение. 2014. № 3. С. 273–282.

## Assessment and Regulation of the Ecological State of Soils Contaminated with Heavy Metals

I. O. Plekhanova<sup>a,\*</sup> and O. A. Zolotareva<sup>a</sup>

<sup>a</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science  
Leninskie Gory 1, bld. 12, Moscow 119992, Russia

\*E-mail: irinaoplekhanova@mail.ru

Contamination of forest gray (Luvisols), leached chernozem (Chernozems Haplic) and chestnut (Castanozems) soils with Pb, Zn and Cd compounds caused a decrease in germination, biomass and length of white mustard seedlings, as well as inhibition of respiration of the studied soils. Cd compounds and polyelement contamination conditions were the most toxic to plants and microorganisms. The greatest mobility of Pb, Zn, and Cd was observed at their simultaneous entry into the soil, and the concentration coefficients of mobile and acid-soluble compounds of these elements were 1.5–2.0 times higher than in the case of monometallic soil contamination. The most sensitive indicator of soil contamination was the ingress of heavy metals into plants.

**Key words:** pollution, heavy metals, mobility of compounds, phytotesting, biotesting, ecotoxicity.

## К 65-ЛЕТИЮ А.Л. ИВАНОВА

DOI: 10.31857/S0002188121070139



5 апреля 2021 года исполнилось 65 лет Иванову Андрею Леонидовичу — доктору биологических наук, профессору, академику РАН.

А.Л. Иванов — крупный ученый в области агрохимии и почвоведения, автор более 360 научных публикаций, в том числе 16 монографий, большого числа учебных пособий и методических документов. Им разработаны принципы и методология интегрированного управления фосфорным режимом почв в агроценозах, созданы и реализованы системы земледелия на ландшафтной основе. Под его руководством решаются фундаментальные проблемы современного земледелия, агрохимии и почвоведения.

Творческая биография А.Л. Иванова включает три периода (казахстанский, владимирский и московский), различающиеся тематикой и масштабами научной и научно-организационной деятельности.

Первые его научные работы были опубликованы еще в студенческие годы. Раннее увлечение

вопросами применения фосфорных удобрений и их превращения в почвах Казахстана в дальнейшем переросло в разработку крупной проблемы оптимизации биогеохимического цикла фосфора. В его основу было положено изучение генезиса его природных форм в почвах различных типов и трансформации фосфатов удобрений в агроэкосистемах. В результате, как дань юношескому научному увлечению, в 2012 г. была опубликована монография «Агробιοгеохимический цикл фосфора».

В 1992 г. А.Л. Иванов начал свою деятельность на посту директора Владимирского НИИ сельского хозяйства (г. Суздаль). Инициативы нового директора совпали с новой программой развития научного земледелия, принятой в 1992 г. на сессии Россельхозакадемии и ориентированной на решение задач экологизации и адаптивной интенсификации земледелия и конструирования агроландшафтов. Уже в 1996 г. эти подходы получили развитие в виде предложенной им программы разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия Владимирской области.

Одновременно в тот же период им были выдвинуты системно-экологические подходы к применению минеральных удобрений, которые в дальнейшем реализовались при формировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Благодаря необычайному организационному таланту А.Л. Иванов сумел подключить к новой проблематике опытных специалистов и ученых из различных организаций.

Под руководством А.Л. Иванова в сотрудничестве с В.И. Кирюшиным была создана первая математическая модель адаптивно-ландшафтного земледелия на примере опытного хозяйства Владимирского НИИСХ и затем разработана методика проектирования систем земледелия на основе ГИС агроэкологической оценки земель. Обсуждение этих достижений заняло важное место в программе съезда Докучаевского общества почвоведов, проведенного в 2000 г. на базе Владимирского НИИСХ по инициативе А.Л. Иванова. Благодаря его организационной деятельности Суздальский съезд по научной значимости и форме проведения оставил наиболее яркий след в истории Докучаевского общества почвоведов.



Такой интегральный подход к решению земельных проблем в контексте исторических и социально-экономических условий – характерная особенность всей последующей научной деятельности А.Л. Иванова. С 2001 г. стержнем этой деятельности на посту вице-президента Российской академии сельскохозяйственных наук и академика-секретаря Отделения земледелия явилось научное обеспечение экологизации земледелия при его одновременной интенсификации путем создания наукоемких агротехнологий, разработки методологии, проектирования и освоения адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Этот этап был подытожен созданием фундаментальной монографии “Агроэкологическая оценка земель. Проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий” (2005). Она была широко апробирована в различных регионах страны в качестве методических рекомендаций при разработке пилотных проектов адаптивно-ландшафтного земледелия и агротехнологий для различных сельскохозяйственных предприятий.

Методология агроэкологической оценки земель и проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия вошла в образовательные программы сельскохозяйственных вузов. За комплекс учебных и учебно-методических изданий А.Л. Иванов удостоен премии Правительства РФ 2013 года в области образования.

Академик А.Л. Иванов уделяет серьезное внимание проблеме изменения климата, его влияния на почвенный покров, почвы и риски земледелия. На эту тему под его редакцией и при непосредственном участии изданы три крупные монографии. С учетом выдвинутых гипотез потепления климата были скорректированы программы научных исследований Россельхозакадемии. В целом усилилось внимание к проблемам климатической адаптации земледелия.

С 2011 г. деятельность А.Л. Иванова в качестве директора Почвенного института им. В.В. Докучаева, направлена на развитие, восстановление лучших традиций института. Расширена научно-исследовательская тематика института, ориентированная на решение крупных научных проблем, возросла его координирующая роль и издательская активность. Регулярно, под редакцией А.Л. Иванова издается Бюллетень Почвенного института.

Издана трехтомная монография “Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственного назначения” (2013). Под его руководством издан “Единый государственный реестр почвенных ресурсов России”, утвержденный и принятый для использования в практической работе Минсельхозом (2014) и Минприроды России (2019).

Почвенный институт под руководством А.Л. Иванова, совместно с научными учреждениями, общественными организациями, учеными, обладающими не только глубокими профессиональными знаниями, но и активной гражданской позицией, принял участие в разработке рекомендаций “Неотложные меры развития агропромышленного комплекса и сельских территорий Нечерноземной зоны Российской Федерации до 2030 года”. Рекомендации были одобрены на заседании комитета Совета Федерации по аграрно-продовольственной политике и природопользованию.

С учетом современных вызовов и масштабных задач, стоящих перед агропромышленным комплексом России, А.Л. Ивановым проделана большая организационная работа, направленная на создание Федерального исследовательского центра (ФИЦ) “Почвенный институт имени В.В. Докучаева”. Центр образован (в соответствии с приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 5 ноября 2019 г. № 1230) путем присоединения к ФГБНУ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева” организаций ФГБНУ “Центральный музей почвоведения им. В.В. Докучаева” и ФГБНУ “Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных земель”. В 2020 г. ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт имени В.В. Докучаева” вошел в состав участников консорциума научного центра мирового уровня (НЦМУ) “Агротехнологии будущего” в рамках национального проекта “Наука”.

А.Л. Иванов ведет большую научно-организационную работу: является членом ряда авторитетных международных сообществ, академий, почетным профессором аграрных университетов, вице-президентом Общества почвоведов им. В.В. Докучаева, членом совета директоров при Федеральном агентстве научных организаций, главным редактором журнала “Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева”, членом редакционных коллегий целого ряда авторитетных научных журналов; он работает в комиссии по присуждению премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

А.Л. Иванов – заслуженный деятель науки Российской Федерации (2007), лауреат премии правительства Российской Федерации в области образования (2013), лауреат премии академика В.Р. Вильямса (2015). В 2019 г. А.Л. Иванов награжден Орденом Почета.

Желаем юбиляру доброго здоровья и дальнейших творческих успехов во благо отечественной науки.

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