

4.1.5. МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА
(СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.41

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_2_75

EDN: NHHCB0

**Поступление микроэлементов и тяжелых металлов в черноземы
выщелоченные при использовании сапропеля в качестве мелиоранта****Елена Владимировна Куликова¹, Надежда Сергеевна Горбунова^{2✉},
Андрей Алексеевич Воронин³, Аркадий Игоревич Громовик⁴**¹ Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
Воронеж, Россия^{2, 3, 4} Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия² vilian@list.ru✉

Аннотация. Приводятся результаты исследования, проведенного с целью определения влияния озерного сапропеля на химические, физико-химические показатели черноземов выщелоченных ботанического сада Воронежского государственного университета, а также на валовое содержание марганца, цинка, меди, никеля, свинца и кадмия. Так как эти элементы относятся к тяжелым металлам, необходимо следить за уровнем их содержания в почве, а также в удобрениях (в том числе и естественного происхождения), применяемых в сельском хозяйстве. Следует подчеркнуть, что марганец, медь и цинк относятся в том числе и к микроэлементам, которые необходимы для полноценного развития сельскохозяйственных культур. Исследование показало, что органическое вещество и микроэлементы, входящие в состав сапропеля, способствуют стабилизации гумусового состояния распахиваемых черноземов. Сапропель имеет нейтральную реакцию среды и обогащен обменными катионами кальция и магния, поэтому его внесение в почву нейтрализует избыточную кислотность, создаваемую катионами водорода в почвенном поглощающем комплексе. Дополнительно привнесенные микроэлементы удерживаются в гумусовом горизонте за счет образования комплексных металлоорганических соединений хелатного типа и в случае необходимости могут быть доступными для питания растений. По содержанию анализируемых тяжелых металлов сапропель относится к первому классу пригодности. Полученные данные свидетельствуют, что валовое содержание тяжелых металлов в исследуемых черноземах находится ниже предельно допустимых концентраций, принятых для почв черноземного ряда. Поэтому можно рекомендовать внесение сапропеля в качестве ценного органического удобрения, а также в качестве подкормки, содержащей микроэлементы.

Ключевые слова: сапропель, черноземы выщелоченные, химические и физико-химические показатели, микроэлементы, тяжелые металлы, марганец, медь, цинк, никель, свинец, кадмий

Для цитирования: Куликова Е.В., Горбунова Н.С., Воронин А.А., Громовик А.И. Поступление микроэлементов и тяжелых металлов в черноземы выщелоченные при использовании сапропеля в качестве мелиоранта // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 2(85). С. 75–82. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_2_75-82.

4.1.5. LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT
AND AGRICULTURAL PHYSICS (AGRICULTURAL SCIENCES)

Original article

**Leached chernozem soil supply with microelements and
heavy metals through sapropel application as an ameliorant****Elena V. Kulikova¹, Nadezhda S. Gorbunova^{2✉}, Andrey A. Voronin³,
Arkady I. Gromovik⁴**¹ Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia^{2, 3, 4} Voronezh State University, Voronezh, Russia² vilian@list.ru✉

Abstract. The authors present the results of a study conducted in order to determine the effect of lake sapropel on the chemical, physical & chemical characteristics of leached chernozem soils located on the territory of Voronezh State University Botanical Garden, as well as on the gross content of manganese, zinc, copper, nickel, lead and cadmium. Since these elements are heavy metals, it is important to monitor the level of their content in the soil, as well as in fertilizers (including those of natural origin) used in agriculture. It should be emphasized that manganese, copper and

zinc are among the trace elements that are necessary for the full development of agricultural crops. The research indicates that the organic matter and trace nutrients contained in the applied sapropel contribute to the stabilization of the humus state of arable chernozems. Lake sapropel has neutral medium reaction and is enriched with exchangeable calcium and magnesium cations, therefore, its introduction into the soil neutralizes the excess acidity caused by hydrogen cations in the soil absorbing complex. Additionally introduced trace nutrients are retained in the humus horizon due to the formation of chelate-type complex organometallic compounds and, if necessary, can be available for plant nutrition. According to the content of the analyzed heavy metals, sapropel belongs to the first land-use-capability class. The data obtained indicate that the gross content of heavy metals in the studied chernozems are below the maximum permissible concentrations accepted for soils of the chernozem type. Therefore, it is possible to recommend sapropel application as a valuable organic fertilizer, as well as a top dressing containing trace nutrients.

Keywords: sapropel, leached chernozem soil, chemical and physicochemical indicators, trace nutrients, heavy metals, manganese, copper, zinc, nickel, lead, cadmium

For citation: Kulikova E.V., Gorbunova N.S., Voronin A.A., Gromovik A.I. Leached chernozem soil supply with microelements and heavy metals through sapropel application as an ameliorant. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2025;18(2):75-82. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_2_75-82.

Введение
Сапропели представляют собой донные отложения озер и являются ценным органическим удобрением и мелиорантом, поскольку содержат не только большое количество органического вещества, но и обогащены тонкодисперсным материалом, коллоидной и предколлоидной фракцией. В свою очередь, тонкодисперсные фракции имеют высокую катионную емкость, обогащены микроэлементами. Все перечисленные особенности определяют ценность сапропелей, эффективность внесения которых доказана рядом исследований и опубликованных работ [2, 3, 8, 15, 16].

Применение сапропелей в качестве удобрений и мелиорантов должно базироваться на исследовании их химического, физико-химического и микроэлементного состава. Так, некоторые сапропели обладают неблагоприятными показателями актуальной и потенциальной кислотности, что связано с геохимическими особенностями места их добычи. Например, отложения сульфатной и сульфидной серы в озерных отложениях дают сильно кислую реакцию среды. Их внесение в почву будет ухудшать состояние актуальной и потенциальной кислотности [14].

В качестве удобрений чаще всего используют сапропели органические и смешанные, в которых доля органического вещества может достигать 70% и более. Сапропели такого типа обогащены легкогидролизуемым N (до 3%), обменным K (до 0,07%), а также микроэлементами (Mn, Cu, Ni, Mo, Co) [1, 9–11]. А.В. Согин и С.М. Штин подчеркивают, что в сравнении с другими природными удобрениями сапропель наиболее обогащен микроэлементами, в том числе и тяжелыми металлами [13]. Кроме того, сапропели по содержанию тяжелых металлов и микроэлементов классифицируются на первый и второй классы пригодности согласно ГОСТу Р-54000-2010 [7]. В современных условиях, когда происходит увеличение антропогенной нагрузки, крайне важно следить за состоянием как озерных отложений, так и почвенного покрова.

Цель исследования – изучить влияние применения сапропеля в качестве удобрения на основные химические и физико-химические показатели чернозема выщелоченного ботанического сада ВГУ, а также на валовое содержание микроэлементов – Mn, Zn, Cu и тяжелых металлов – Ni, Pb, Cd в исследуемых почвах.

Место и методика исследований

Объектами исследования являются черноземы выщелоченные среднemosные мало- и среднегумусные тяжелосуглинистые на покровном карбонатном суглинке ботанического сада ВГУ, который расположен в Центральном районе города Воронежа. Ботанический сад Воронежского государственного университета занимает площадь около 72 га и помимо коллекционных видов растений осуществляет деятельность по закладке полевых опытов, одним из которых является изучение влияния сапропеля на повышение плодородия черно-

земов выщелоченных. Для выявления влияния внесения сапропеля почвенные разрезы закладывались на мелиорируемом участке и на контрольном варианте – без внесения мелиоранта. Анализу подвергался и фоновый участок, почвы которого представлены залежью, не испытывающей антропогенного воздействия.

Гумусовое состояние является одним из ведущих факторов в определении почвенного плодородия. Для его определения использовался метод И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова.

Определяли рН водной суспензии, учитывая то, что на почвенное плодородие влияют такие показатели, как рН и состояние почвенного поглощающего комплекса. Гидролитическую кислотность определяли по Каппену.

Содержание обменных катионов кальция и магния определяли по методике для некарбонатных и незасоленных почв и по методу Тюрина для карбонатных почв [17].

Как отмечалось выше, сапропели в своем составе, помимо органических веществ, содержат большое количество микроэлементов, в том числе и тяжелых металлов. Поэтому валовое содержание марганца, меди, цинка, никеля, свинца и кадмия определяли инструментальным методом на волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger в лаборатории коллективного пользования Воронежского госуниверситета [5–7, 12]. Исследованию подвергались как почвы, так и сапропель, извлеченный из озера, расположенного на территории ботанического сада.

Результаты аналитических исследований обрабатывали статистически с использованием программ Statistica 6,0 и Microsoft Excel 2010.

Результаты и их обсуждение

Сапропели являются органическим удобрением, поэтому их мелиоративное действие в первую очередь связано с оптимизацией содержания органического вещества в распахиваемых почвах, а также сохранением показателей их гумусового состояния, поскольку возделывание сельскохозяйственных культур сопряжено с регулярной распашкой территории, которая ведет к усилению минерализации гумуса и его процентному сокращению. Так, черноземы выщелоченные фонового участка в верхнем 0–20 см слое содержат $6,72 \pm 0,45\%$ гумуса, что соответствует градации среднегумусных видов. В результате сельскохозяйственного воздействия содержание гумуса падает до $5,47 \pm 0,51\%$, черноземы деградируют до малогумусных. Внесение сапропеля в качестве органического удобрения, который содержит в своем составе $30,7 \pm 2,03\%$ органического вещества, не только восполняет безвозвратно выносимое с урожаем сельскохозяйственных культур органическое вещество, но и способствует стабилизации гумуса, содержание которого достигает $6,45 \pm 0,17\%$ в пахотном горизонте черноземов (табл. 1).

Довольно часто сапропели используют с целью нормализации почвенной кислотности, особенно на почвах, имеющих высокие значения гидролитической кислотности. При этом важным условием является то, чтобы рН сапропеля была нейтральной. Применяемый в качестве мелиоранта сапропель имеет нейтральную реакцию среды – рН равняется $7,3 \pm 0,19$ ед. Фоновые почвы ботанического сада имеют слабокислую реакцию среды в верхней части почвенного профиля, которая равна $6,89 \pm 0,15$ ед. При распахке черноземов выщелоченных отмечается некоторое подкисление почвенного раствора и снижение уровня рН до $6,17 \pm 0,18$ ед. Применение сапропеля на распахиваемом участке нормализует рН до нейтральных значений – $7,18 \pm 0,14$ ед. (табл. 1).

Уровень гидролитической кислотности является рН-зависимой величиной, поэтому, согласно полученным данным, наибольшие ее значения – $2,19 \pm 0,12$ ммоль(+)/100 г почвы – были определены в верхнем 0–20 см слое черноземов пашни, что в 2 раза превышает данный показатель фонового участка – $1,11 \pm 0,10$ ммоль(+)/100 г почвы. Такое явление связано с тем, что в процессе распашки обменный кальций, входящий в почвенный поглощающий комплекс, активно потребляется сельскохозяйственными культурами, а

освобожденное место довольно быстро занимает обменным водородом, который определяет гидролитическую кислотность. Данное положение подтверждается величиной обменного Ca^{2+} , находящегося на уровне $30,0 \pm 2,08$ ммоль(+)/100 г почвы в 0–20 см слое черноземов пашни, против $36,5 \pm 1,99$ ммоль(+)/100 г почвы черноземов фонового участка.

Таблица 1. Химические и физико-химические показатели черноземов выщелоченных ботанического сада ВГУ

Глубина, см	Гумус, %	рН водн.	Обменные катионы, ммоль(+)/100 г почвы		
			Hr ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Черноземы выщелоченные среднегумусные среднесиловые тяжелосуглинистые (фоновый участок), n = 11					
0–20	6,72 ± 0,45	6,89 ± 0,15	1,11 ± 0,10	36,5 ± 1,99	6,1 ± 0,97
20–40	4,90 ± 0,39	7,01 ± 0,11	0,90 ± 0,08	34,2 ± 1,01	5,7 ± 0,85
40–60	2,64 ± 0,87	7,13 ± 0,20	0,47 ± 0,07	32,6 ± 1,05	5,6 ± 0,87
60–80	1,41 ± 0,68	7,37 ± 0,15	0,11 ± 0,03	30,8 ± 1,09	5,3 ± 0,64
80–100	1,07 ± 0,41	7,60 ± 0,12	–	27,5 ± 1,01	5,1 ± 0,52
100–120	0,69 ± 0,23	8,07 ± 0,18	–	25,8 ± 0,98	4,8 ± 0,49
Черноземы выщелоченные малогумусные среднесиловые тяжелосуглинистые (пашня контроль), n = 12					
0–20	5,47 ± 0,51	6,17 ± 0,18	2,19 ± 0,12	30,0 ± 2,08	5,9 ± 0,88
20–40	4,02 ± 0,62	6,55 ± 0,21	1,72 ± 0,05	29,1 ± 1,96	5,8 ± 0,69
40–60	2,46 ± 0,73	6,94 ± 0,19	1,02 ± 0,07	27,6 ± 1,69	5,6 ± 0,78
60–80	1,21 ± 0,54	7,34 ± 0,17	0,41 ± 0,02	26,2 ± 1,54	5,4 ± 0,29
80–100	0,96 ± 0,29	7,73 ± 0,13	–	25,6 ± 1,57	5,2 ± 0,36
100–120	0,57 ± 0,11	8,12 ± 0,15	–	23,2 ± 1,12	4,9 ± 0,33
Черноземы выщелоченные среднегумусные среднесиловые тяжелосуглинистые (пашня с внесением сапропеля), n = 12					
0–20	6,45 ± 0,17	7,18 ± 0,14	0,99 ± 0,08	36,0 ± 1,89	6,4 ± 0,89
20–40	5,27 ± 0,38	7,40 ± 0,17	0,05 ± 0,01	35,4 ± 1,12	6,2 ± 0,86
40–60	2,78 ± 0,42	7,57 ± 0,14	–	34,3 ± 1,10	6,0 ± 0,49
60–80	1,82 ± 0,36	7,81 ± 0,18	–	31,9 ± 1,01	5,8 ± 0,77
80–100	1,14 ± 0,24	7,93 ± 0,11	–	30,4 ± 1,32	5,6 ± 0,64
100–120	0,72 ± 0,17	8,00 ± 0,09	–	27,8 ± 1,00	5,2 ± 0,51

Примечание: n – количество образцов; $\bar{X}$ – среднее арифметическое; $S_{\bar{X}}$ – ошибка среднего арифметического.

Внесение сапропеля на распаханную территорию способствует улучшению состояния почвенно-поглощающего комплекса. Отмечается снижение водорода гидролитической кислотности до $0,99 \pm 0,08$ ммоль(+)/100 г почвы и увеличение обменного кальция до $36,0 \pm 1,89$ ммоль(+)/100 г почвы. Содержание обменного кальция в составе сапропеля составляло $43,7 \pm 1,01$ ммоль(+)/100 г. Содержание обменного магния, входящего в почвенно-поглощающий комплекс, увеличилось до $6,4 \pm 1,01$ ммоль(+)/100 г почвы в результате применения сапропеля, что связано с присутствием данного элемента в составе удобрения в количестве $10,8 \pm 1,03$ ммоль(+)/100 г. Полученные данные подтверждают положительное влияние сапропеля на почвенную кислотность, а также на состояние почвенного поглощающего комплекса.

Анализируя профильное распределение химических и физико-химических показателей, следует подчеркнуть, что сапропель оказывает достоверное влияние на гумусовый горизонт исследуемых черноземов выщелоченных, что связано с отсутствием сквозного промачивания исследуемых почв. Так, вниз по профилю всех исследуемых вариантов отмечается постепенное снижение содержания гумуса до уровня залегания почвообразующей породы, где минимальное его количество составляет 0,57–0,72%.

С глубиной отмечается подщелачивание рН почвенного раствора, за счет влияния карбонатных почвообразующих пород на глубине 100–120 см рН составляет 8,00–8,12 ед. Благодаря влиянию карбонатов исчезает гидролитическая кислотность. Обменные катионы кальция и магния входят в состав почвенного поглощающего комплекса, состав кото-

рого в черноземных почвах определяется органоминеральными коллоидными частицами, содержание которых снижается вниз по профилю черноземов, что отражается и на количестве обменных кальция и магния (табл. 1).

Вносимый сапропель в своем составе содержит следующее валовое содержание исследуемых тяжелых металлов, мг/кг:

- Mn – $423,3 \pm 10,7$;
- Zn – $11,1 \pm 2,1$;
- Cu – $78,2 \pm 5,3$;
- Ni – $21,1 \pm 3,7$;
- Pb – $24,3 \pm 2,1$;
- Cd – $1,07 \pm 0,5$.

Озерный сапропель, который вносили в почву, согласно ГОСТ Р 54000-2010 относится к 1-му классу пригодности, поскольку содержание в нем тяжелых металлов не превышает следующие значения, мг/кг: Mn – 500; Zn – 30; Cu – 100; Ni – 50; Pb – 50; Cd – 3 [7].

Валовое содержание марганца в горизонте А черноземов фонового участка, не испытывающего антропогенного воздействия, составляет $577,1 \pm 10,1$ мг/кг (табл. 2), вниз по профилю происходит его постепенное снижение, а в почвообразующей породе вновь отмечается накопление элемента.

Повышенное содержание марганца в верхнем гумусовом горизонте связано с тем, что он является биогенным элементом, активно потребляется растительными и животными организмами, которые после отмирания поступают в почву, а обогащенность исследуемых черноземов гумусовыми веществами способствует закреплению металла, поскольку этот элемент способен образовывать комплексные соединения хелатного типа с гумусовыми веществами.

Таблица 2. Валовое содержание Mn, Zn, Cu, Ni, Pb и Cd в черноземах выщелоченных ботанического сада ВГУ

Горизонт отбора образца	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd
Черноземы выщелоченные среднегумусные среднесиловые тяжелосуглинистые (фоновый участок), $n = 11$						
A	$577,1 \pm 10,1$	$41,2 \pm 2,3$	$19,8 \pm 1,8$	$32,2 \pm 2,0$	$24,4 \pm 1,7$	$0,19 \pm 0,03$
AB	$549,2 \pm 9,7$	$38,6 \pm 3,1$	$16,6 \pm 1,5$	$28,6 \pm 1,9$	$22,0 \pm 1,6$	$0,17 \pm 0,04$
B _t	$519,9 \pm 11,0$	$33,1 \pm 2,0$	$15,9 \pm 1,4$	$27,1 \pm 1,6$	$21,3 \pm 1,6$	$0,16 \pm 0,02$
BC _{Ca}	$532,4 \pm 8,7$	$34,5 \pm 1,8$	$14,1 \pm 1,6$	$27,9 \pm 1,7$	$20,5 \pm 1,4$	$0,15 \pm 0,01$
CCa	$549,5 \pm 6,5$	$40,8 \pm 1,7$	$15,5 \pm 1,8$	$30,4 \pm 1,4$	$22,1 \pm 1,4$	$0,18 \pm 0,02$
Черноземы выщелоченные малогумусные среднесиловые тяжелосуглинистые (пашня контроль), $n = 12$						
A _{пах}	$549,2 \pm 12,3$	$36,4 \pm 2,1$	$16,1 \pm 1,7$	$30,0 \pm 1,8$	$24,3 \pm 1,5$	$0,19 \pm 0,01$
AB	$534,3 \pm 10,4$	$35,1 \pm 2,0$	$15,3 \pm 1,6$	$28,5 \pm 1,8$	$22,2 \pm 1,2$	$0,18 \pm 0,01$
B _t	$523,8 \pm 10,0$	$33,0 \pm 1,7$	$14,0 \pm 1,4$	$26,1 \pm 1,2$	$21,0 \pm 1,6$	$0,17 \pm 0,02$
BC _{Ca}	$536,8 \pm 9,8$	$35,1 \pm 1,5$	$13,8 \pm 1,3$	$26,1 \pm 1,1$	$20,8 \pm 1,1$	$0,16 \pm 0,01$
CCa	$540,6 \pm 9,5$	$39,2 \pm 1,5$	$15,1 \pm 1,3$	$29,6 \pm 1,1$	$22,4 \pm 1,4$	$0,18 \pm 0,01$
Черноземы выщелоченные среднегумусные среднесиловые тяжелосуглинистые (пашня с внесением сапропеля), $n = 12$						
A _{пах}	$560,0 \pm 10,1$	$39,8 \pm 1,9$	$25,8 \pm 1,8$	$34,7 \pm 1,7$	$24,4 \pm 1,4$	$0,19 \pm 0,02$
AB	$538,1 \pm 12,4$	$36,9 \pm 1,8$	$22,3 \pm 1,6$	$30,1 \pm 1,6$	$22,5 \pm 1,7$	$0,19 \pm 0,02$
B _t	$526,7 \pm 11,5$	$35,4 \pm 1,6$	$18,1 \pm 1,5$	$29,8 \pm 1,3$	$20,7 \pm 1,3$	$0,19 \pm 0,02$
BC _{Ca}	$530,4 \pm 9,6$	$35,0 \pm 1,6$	$16,9 \pm 1,4$	$25,4 \pm 1,3$	$20,6 \pm 1,5$	$0,18 \pm 0,01$
CCa	$541,1 \pm 9,7$	$38,9 \pm 1,5$	$15,1 \pm 1,4$	$30,0 \pm 1,5$	$21,8 \pm 1,2$	$0,19 \pm 0,02$
ПДК [4]	1500	150	100	100	30	1

Примечание: обозначения те же, что и в таблице 1, ПДК – предельно допустимые концентрации для почв черноземного ряда.

В результате распашки отмечается уменьшение валового содержания марганца до $549,2 \pm 12,3$ мг/кг (табл. 2), что связано не только с тем, что этот элемент выносится с урожаем сельскохозяйственных культур (марганец является микроэлементом, необходимым для полноценного роста и развития растений), но и с повышенной минерализацией гумуса. В результате распада молекул гумусовых веществ высвобождается часть марганца, которая перераспределяется по почвенному профилю, о чем свидетельствует увеличение элемента в горизонте Bt относительно фонового участка. Внесение сапропеля компенсирует потери микроэлемента из гумусового горизонта, поэтому его содержание достигает $560,0 \pm 10,1$ мг/кг (табл. 2). Аналогично фоновому участку отмечается накопление марганца и в почвообразующей породе пахотных черноземов выщелоченных. Аккумуляция марганца в почвообразующей породе связана с тем, что горизонт Cca представлен покровными карбонатными суглинками, которые имеют щелочную реакцию среды. В таких условиях элемент становится малоподвижным.

Аналогичная тенденция наблюдается в профильном распределении валового содержания цинка и меди: их накопление в горизонте A почв фонового участка увеличивается и достигает соответственно $41,2 \pm 2,3$ и $19,8 \pm 1,8$ мг/кг (табл. 2). Почвообразующая порода служит геохимическим барьером на пути миграции этих элементов. Отмечается осаждение цинка и меди при щелочной реакции почвенного раствора. Сапропель, содержащий в своем составе данные микроэлементы, способен восполнять их в пахотном горизонте, при этом отмечается увеличение валового содержания меди даже относительно фонового участка.

Помимо микроэлементов, сапропели в своем составе могут содержать и тяжелые металлы (ТМ), в том числе никель, свинец и кадмий, избыточное содержание которых приводит к токсическому действию на растительные и животные организмы. В черноземах выщелоченных фонового участка содержание никеля, свинца и кадмия составляет соответственно $32,2 \pm 2,0$, $24,4 \pm 1,7$ и $0,19 \pm 0,03$ мг/кг (табл. 2). Их приуроченность к гумусовому горизонту связана с тем, что элементы способны к активному взаимодействию с гуминовыми кислотами, в результате чего образуются хелатные комплексные соединения. Вниз по профилю исследуемых почв отмечается постепенное снижение их валового содержания и вновь концентрация на карбонатном геохимическом барьере, поскольку щелочная реакция среды препятствует их дальнейшей миграции. Вовлечение черноземов выщелоченных в сельскохозяйственное использование слабо влияет на процессы накопления и перераспределения валового содержания никеля, свинца и кадмия. Применение сапропеля способствует повышению содержания только никеля в гумусовом горизонте – $34,7 \pm 1,7$ мг/кг (табл. 2).

По полученным данным, валовое содержание ТМ во всех случаях находится в пределах нормы и не превышает ПДК, принятых для черноземных почв [4], что делает возможным применение сапропеля в качестве не только ценного органического удобрения, но и микроудобрения.

Выводы

Применение сапропеля в качестве органического удобрения на черноземах выщелоченных ботанического сада Воронежского государственного университета приводит к стабилизации гумусового состояния, черноземы диагностируются как среднегумусные, аналогично фоновому участку, который не подвергается распашке. При этом контрольный распахиваемый вариант без сапропеля деградирует до малогумусного состояния.

Отмечается изменение значения pH почвенного раствора при использовании сапропеля, поскольку вносимый мелиорант имеет нейтральную реакцию среды и обогащен обменными катионами кальция и магния, которые при поступлении в почву вытесняют из почвенного поглощающего комплекса водород, занимая его место. Таким образом, происходит улучшение физико-химических показателей почв.

Использование сапропеля улучшает микроэлементный состав черноземов выщелоченных, поскольку входящие в его состав марганец, медь и цинк хорошо закрепляются в пахотном горизонте, образуют комплексные органоминеральные соединения хелатного типа, при этом, в случае необходимости, способны использоваться растительными организмами. Что касается никеля, свинца и кадмия, то данные тяжелые металлы также входят в состав исследуемого органического удобрения, но их содержание находится в пределах нормы согласно ГОСТ Р 54000-2010. Количественное содержание тяжелых металлов в изучаемом сапропеле относит удобрение к первому классу пригодности.

Валовое содержание тяжелых металлов во всех исследуемых вариантах находится ниже ПДК, разработанных для почв черноземного ряда. Поэтому применение озерного сапропеля в качестве органического удобрения является благоприятным на черноземах выщелоченных, при этом необходимо проводить регулярные мониторинговые исследования, следить за состоянием исследуемых почв и озерного сапропеля, поскольку территория ботанического сада находится в пределах городской черты и наземные экосистемы испытывают антропогенную нагрузку.

Список источников

1. Баранов А.И. Влияние сапропеля на плодородие почвы, урожайность и качество продукции в звене севооборота «кукуруза на зеленую массу – сахарная свекла»: автореферат дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04. Москва, 2020. 20 с.
2. Борисов В.А. Система удобрения овощных культур: монография. Москва: Росинформагротех, 2016. 394 с.
3. Борисов В.А., Успенская О.Н., Васючков И.Ю. и др. Агрохимические свойства органоминеральных сапропелей // Агрохимия. 2015. № 12. С. 49–55.
4. Горбунова Н.С., Громовик А.И., Девятова Т.А. и др. Загрязнение почв. Способы контроля и нормирования: учебное пособие. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2022. 80 с.
5. ГОСТ 27979-88. Удобрения органические. Метод определения рН. Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. 7 с.
6. ГОСТ 27980-88. Удобрения органические. Методы определения органического вещества. Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. 11 с.
7. ГОСТ Р-54000-2010. Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия. Москва: Стандартформ, 2011. 15 с.
8. Евдокимова Г.А., Успенская О.Н., Кухарчик В.В. Биологический и химический состав органического вещества малозольных сапропелей БССР // Химия твердого топлива. 1986. № 2. С. 14–21.
9. Кирейчева Л.В., Нефедов А.В., Евсенкин К.Н. и др. Обоснование использования удобрительно-мелиорирующей смеси на основе сапропеля для повышения плодородия деградированных почв // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2016. № 3. С. 27–31.
10. Кирейчева Л.В., Хохлова О.Б. Сапропели и их использование в качестве удобрений и мелиорантов для повышения продуктивности земледелия [Исследования эффективности применения сапропеля и удобрительно-мелиоративных смесей (УМС) на его основе в различных регионах] // Системы использования органических удобрений и возобновляемых ресурсов в ландшафтном земледелии: сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию Судогодского опытного поля; в 2 т. Владимир: ГНУ ВНИИОУ Россельхозакадемии, 2013. Т. 2. С. 41–51.
11. Кирейчева Л.В., Яшин В.М. Эффективность применения органоминеральных удобрений на основе сапропеля // Агрохимический вестник. 2015. № 2. С. 37–41.
12. Методические указания по агрохимическому анализу сапропелей. Москва: ЦИНАО, 1982. 52 с.
13. Согин А.В., Штин С.М. Добыча сапропеля и возможности отечественных земснарядов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 1. С. 130–137.
14. Успенская О.Н., Борисов В.А., Васючков И.Ю. Агрохимические свойства органо-железистых сапропелей и их влияние на развитие проростков овса // Агрохимия. 2017. № 3. С. 33–37.
15. Хохлов Б.Н. Использование сапропеля на удобрение. Ярославль: Верхне-Волжское книжное изд-во, 1988. 172 с.
16. Штин С.М. Озерные сапропели и основы их комплексного освоения. Москва: Изд-во Московского государственного горного университета, 2005. 371 с.
17. Щеглов Д.И., Громовик А.И., Горбунова Н.С. Основы химического анализа почв: учебное пособие. Воронеж: ВГУ, 2019. 332 с.

References

1. Baranov A.I. The influence of sapropel on soil fertility, yield and quality of products in crop rotation link "green corn – sugar beet". Author's Abstract of Candidate Dissertation in Agricultural Sciences: 06.01.04. Moscow; 2020. 20 p. (In Russ.).
2. Borisov V.A. Fertilization system for vegetable crops: monograph. Moscow: Rosinformagrotech Publishers; 2016. 394 p. (In Russ.).
3. Borisov V.A., Uspenskaja O.N., Vasyuchkov I.Yu. et al. The agrochemical properties of organic-mineral sapropel. *Agrohimia*. 2015;12:49-55. (In Russ.).
4. Gorbunova N.S., Gromovik A.I., Devyatova T.A. et al. Soil pollution. Methods of control and regulation: textbook. Voronezh: Voronezh State University Publishing House; 2022. 80 p. (In Russ.).
5. GOST 27979-88. Organic Fertilizers. pH determination method. Moscow: USSR State Committee on Standards; 1989. 7 p. (In Russ.).
6. GOST 27980-88. Organic Fertilizers. Organic determination methods. Moscow: USSR State Committee on Standards; 1989. 11 p. (In Russ.).
7. GOST R-54000-2010. Organic Fertilizers. Sapropels. General specifications. Moscow: Standartform; 2011. 15 p. (In Russ.).
8. Evdokimova G.A., Uspenskaya O.N., Kukharchik V.V. Biological and chemical composition of organic matter of low-ash sapropels of the BSSR. *Solid Fuel Chemistry*. 1986;2:14-21. (In Russ.).
9. Kireycheva L.V., Nefedov A.V., Evsenkin K.N. The rationale for the use of fertilizing ameliorative mixtures on the basis of peat and sapropel for improving the fertility of degraded soils. *Bulletin of Ryazan State Agro-technological University named after P.A. Kostychev*. 2016;3:27-31. (In Russ.).
10. Kireicheva L.V., Khokhlova O.B. Sapropels and their use as fertilizers and ameliorants to increase agricultural productivity [Studies on the effectiveness of sapropel and fertilizer-reclamation mixtures (FRM) based on it in various regions]. In: Systems for Application of Organic Fertilizers and Renewable Resources in Landscape Agriculture: Collection of Reports of the All-Russian Research-to-Practice Conference with International Participation Dedicated to the 100th Anniversary of the Sudogodsky Experimental Field; in 2 volumes. Vladimir: All-Russian Scientific Research Institute of Organic Fertilizers and Peat of the Russian Agricultural Academy Publishers. 2013;2:41-51. (In Russ.).
11. Kireycheva L.V., Yashin V.M. Efficiency of organic-mineral fertilizers based on sapropel *Agrochemical Herald*. 2015;2:37-41. (In Russ.).
12. Methodological guidelines for agrochemical analysis of sapropels. Moscow: Central Scientific Research Institute of Agrochemical Services of Agriculture Publishers; 1982. 52 p. (In Russ.).
13. Sogin A.V., Shtin S.M. Sapropel extraction and capabilities of domestic dredgers. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2011;1:130-137. (In Russ.).
14. Uspenskaya O.N., Borisov V.A., Vasyuchkov I.Yu. The agrochemical properties of organic-iron sapropels and their effect on oat seedlings growth. *Agrohimia*. 2017;3:33-37. (In Russ.).
15. Khokhlov B.N. Application of sapropel as fertilizer. Yaroslavl: Verkhne-Volzhskoe Book Publishing House; 1988. 172 p. (In Russ.).
16. Shtin S.M. Lake sapropels and the s of their development. Moscow: Moscow State Mining University Publishers; 2005. 371 p. (In Russ.).
17. Shcheglov D.I., Gromovik A.I., Gorbunova N.S. Fundamentals of chemical analysis of soils: textbook. Voronezh: Voronezh State Mining University Publishers; 2019. 332 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.В. Куликова – кандидат биологических наук, доцент кафедры геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», melior-agronomy@inbox.ru.
Н.С. Горбунова – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и земельных ресурсов ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», vilian@list.ru.
А.А. Воронин – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, директор ботанического сада ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», voronin@bio.vsu.ru.
А.И. Громовик – доктор биологических наук, доцент кафедры экологии и земельных ресурсов ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», agrom.ps@mail.ru.

Information about the authors

E.V. Kulikova, Candidate of Biological Sciences, Docent, the Dept. of Geodesy, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, melior-agronomy@inbox.ru.
N.S. Gorbunova, Candidate of Biological Sciences, Docent, the Dept. of Ecology and Land Resources, Voronezh State University, vilian@list.ru.
A.A. Voronin, Candidate of Agricultural Sciences, Docent, Director of the Botanical Garden of Voronezh State University, voronin@bio.vsu.ru.
A.I. Gromovik, Doctor of Biological Sciences, Docent, the Dept. of Ecology and Land Resources, Voronezh State University, agrom.ps@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.03.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 10.05.2025.

The article was submitted 20.03.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 10.05.2025.

© Куликова Е.В., Горбунова Н.С., Воронин А.А., Громовик А.И., 2025