

УДК 631.81.095.337:631.873.1

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В САПРОПЕЛЯХ – ПРИРОДНОМ МАТЕРИАЛЕ НА УДОБРЕНИЕ ДЛЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

© 2019 г. О. Н. Успенская^{1,2,*}, И. Ю. Васючков^{1,**}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал ФТБНУ ФНЦО
140153 Верея, стр. 500, Раменский р-н, Московская обл., Россия*

² *Институт лесоведения РАН
143030 Успенское, Одинцовский р-н, Московская обл., Россия*

**E-mail: usp-olga@yandex.ru*

***E-mail: gamov_igor@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.12.2018 г.

После доработки 23.01.2019 г.

Принята к публикации 10.07.2019 г.

Определили содержание 15 микроэлементов, в том числе тяжелых металлов, в 8-ми видах сапропелей на удобрение, взятых из сапропелевых месторождений 15-ти областей РФ. Показано, что сапропели – перспективный природный материал для органического земледелия, с помощью которого можно восполнить дефицит жизненно важных микроэлементов в почвах. Их содержание в сапропелях может в 2–7 раз превышать кларки для почв мира. Содержание тяжелых металлов в естественных сапропелях всех видов находится в пределах норм, допустимых для сапропелевых удобрений по ГОСТ Р 54000-2010.

Ключевые слова. Органическое земледелие, сапропель, микроэлементы, тяжелые металлы.

DOI: 10.1134/S0002188119100132

ВВЕДЕНИЕ

Сапропели (донные отложения озер) – крупный резерв природных удобрений для органического земледелия, переход к которому от интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур окончательно назрел [1]. Главная ценность сапропеля состоит в количестве и качестве его органической составляющей. Однако не менее важно и то, что сапропели содержат широкий спектр микроэлементов, которые являются обязательными компонентами минерального питания растений, животных и человека. Известно, что без микроэлементов невозможно осуществление любых физиологических и биохимических процессов в живых организмах. Они необходимы для белкового, углеводного и жирового обменов, для образования ферментов, витаминов, гормонов, для обеспечения дыхательных функций. Они участвуют в биохимических процессах преобразования, переноса и накопления органических веществ в экосистемах, стимулируя деятельность почвенных микроорганизмов. Микроэлементы обладают противовирусными, противогрибковыми, антитоксическими свойствами, повышают устойчивость живых организ-

мов к стрессовым условиям окружающей среды, обеспечивают нормальное функционирование репродуктивных органов.

Абсолютно необходимы кобальт, медь, цинк, марганец, бор, молибден, никель; в отсутствие хотя бы одного из них растительные и животные организмы развиваться не могут. В эту группу входят и так называемые “тяжелые металлы” (ТМ), атомный вес которых >40 а.е.м. Вредное воздействие этих элементов проявляется только при концентрациях больше предельно допустимых. Исключение составляют свинец, кадмий и ртуть – ТМ, любая концентрация которых выше фоновой, токсична для живых организмов. В сапропелях содержатся и многие другие микроэлементы (Cr, Be, Ba, Sr, J, Y, Zr, Ag, Tl, Sb, Sc, Li, Bi, As, F и т.п.), влияние большинства из которых на живые организмы науке еще предстоит определить.

Крупномасштабный мониторинг плодородия почв РФ на площади 44 млн га показал, что в стране преобладают пашни с недостаточным содержанием подвижных форм микроэлементов. Низкую и среднюю обеспеченность бором имеют 33.6% пахотных земель, молибденом – 79.8, цин-

ком – 95.5, медью – 50.9, марганцем – 65.7, кобальтом – 84.7%. Пахотных земель с содержанием ТМ выше предельно допустимых норм в целом в стране немного: загрязненных медью – 3.8, никелем – 2.8, кобальтом – 1.9, свинцом – 1.7, кадмием и хромом – 0.5, цинком – 0.2% [2].

Микроэлементный состав сапропелей связан с геологическим строением местности и составом вмещающих озерную ванну пород, с составом грунтовых и поверхностных стоков в водоеме, эоловым привносом элементов с водосбора. Он связан также с составом организмов, обитающих в воде и около воды и образующих после отмирания органическое вещество озерных отложений (макрофиты, водоросли разных типов, беспозвоночные животные). Большое значение имеет накопление микроэлементов на геохимических и биогеохимических барьерах, создающихся в озерах в процессе изменений окружающей среды на протяжении сотен и тысяч лет их существования. Имеют значение различные физико-химические и биохимические преобразования веществ, непрерывно происходящих в воде и донных отложениях озер.

В литературе имеются сведения о содержании микроэлементов в сапропелях РФ. Однако они имеют бессистемный характер. Как правило, определяли ограниченные и разные наборы элементов, на отдельных объектах отдельных регионов без сравнения полученных данных с таковыми в других регионах РФ, а также их различные формы (валовые, подвижные) и, главное, без привязки к определенным классификационным схемам.

Цель работы – показать характеристику важнейших видов сапропелей [3], пригодных для производства удобрений или для кольматации техногенно нарушенных земель, по содержанию наиболее значимых для этих целей микроэлементов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования была взята 51 проба отложений 8-ми видов отложений из сапропелевых месторождений Московской, Рязанской, Тверской, Вологодской, Свердловской, Воронежской, Псковской, Костромской, Тамбовской, Новосибирской, Томской, Тюменской, Челябинской, Калининградской обл. и Республики Коми.

Количество проб по видам сапропелей, пригодных для удобрительных целей, распределилось следующим образом: органический – 9, органо-силикатный – 15, органо-известковистый – 8, органо-железистый – 5, известковый – 5, гли-

нисто-известковистый – 5, известково-железистый – 2, глинистый – 2 шт.

Определяли валовые формы следующих 15-ти микроэлементов: кадмий, молибден, никель, цинк, свинец, хром, медь, кобальт, бор, марганец, бериллий, барий, стронций, ванадий плазменно-эмиссионным методом на квантометре Labtest UF-25 (Австралия), ртуть – на приборе MAS-50 Perkin-Elmer. Результаты пересчитывали на абсолютно сухое вещество сапропеля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения микроэлементов приведены в табл. 1. В них отражены средние содержания микроэлементов в каждом из видов сапропелей и диапазон их изменений в пределах вида.

В таблице 2 даны средние суммарные содержания микроэлементов и диапазон изменений их величин в сапропелях в целом, а также проведено сопоставление средних содержаний элементов в сапропелях с кларковыми для литосферы и почв мира [4–6].

Известно, что основной источник микроэлементов в ландшафтах, в том числе в осадочных породах и почвах, – продукты выветривания литосферы Земли. Продукты выветривания кислых пород (граниты, липариты) бедны никелем, кобальтом, медью, а основных пород (базальты, габбро) – обогащены этими элементами. Некоторые из микроэлементов (бор, йод, селен) могут поступать из атмосферных газов, газообразных выбросов вулканов, с метеоритными осадками [7].

Несмотря на значительные диапазоны изменений содержания всех изученных микроэлементов в каждом из видов сапропелей (табл. 1), средние показатели их содержания в целом очень близки к таковым для литосферы и почв мира (табл. 2). Так как сапропели формировались в озерах на протяжении сотен и тысяч лет, они представляют собой неотъемлемую часть развивающегося в голоцене элемента земной поверхности.

Содержание микроэлементов в отдельных видах сапропелей сильно отличается от фоновых и средних для сапропелей в целом. Например, в органических сапропелях может содержаться молибдена в 6 раз больше, чем в среднем в почвах мира, никеля – в 3–7 раз больше, цинка и хрома – в 2–4 раза, меди – в 3–5 раз, кобальта – в 3–4 раза, бора – в 2–7 раз, марганца – в 2 раза. Органо-силикатные сапропели, наиболее распространенные в природе, могут содержать молибдена, цин-

Таблица 1. Средние содержания микроэлементов и диапазоны их варьирования в различных видах сапропелей, мг/кг абсолютно-сухого вещества

Микроэлемент	Виды сапропелей							
	органический		органо-силикатный		органо-известковый		органо-железистый	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Cd	0.5	0.2–1.0	0.5	0.2–1.3	0.3	0.2–0.4	0.6	0.1–0.9
Mo	3.0	0.5–12.4	1.6	0.7–2.8	2.8	1.3–6.0	1.7	1.1–2.4
Ni	56.8	15.9–143	37.1	11.3–84.0	21.4	2.5–37.3	45.5	44.9–73.3
Zn	146	66.7–215	90.3	31.4–220	76.7	22.3–112	145	105–216
Pb	11.6	5.6–21.7	12.1	1.3–21.6	16.7	6.9–27.2	17.7	11.7–26.5
Cr	95.7	25.7–260	149	70.0–355	95.7	38.8–225	148	90.0–224
Cu	51.6	15.1–109	35.1	12.4–81.8	24.7	4.0–45.6	51.0	10.4–101
Co	16.2	6.4–31.1	14.9	6.6–39.0	7.4	2.3–18.3	22.3	7.0–38.0
B	42.8	12.4–94.1	29.7	7.2–81.0	13.8	4.4–25.6	61.0	33.5–87.8
Mn	508	116–1300	345	87.3–947	640	153–1580	444	164–627
Be	1.6	0.6–2.0	1.5	0.4–3.4	0.9	0.6–1.6	2.0	1.0–3.0
Ba	164	29.1–369	293	71.4–380	129	44.7–240	692	130–843
Sr	116	42.7–236	92.5	19.3–206	219	27.5–332	90.0	26.5–164
V	81.6	49.3–105	97.5	20.3–215	65.2	30.5–90.9	94.2	24.8–295
Hg	0.11	<0.1–0.3	0.03	<0.01–0.1	<0.01	<0.01	0.04	0.01–0.09
	известковый		глинисто-известковый		известково-железистый		глинистый	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Cd	0.5	0.06–0.9	0.2	0.1–0.3	0.5	0.47–0.52	0.65	0.3–1.0
Mo	1.6	0.5–1.6	1.4	0.6–2.2	1.1	1.0–1.1	1.85	1.7–2.0
Ni	29.4	3.0–51.8	46.4	23.2–64.1	9.2	5.1–13.3	72.9	39.7–106
Zn	32.4	4.7–75.3	49.1	18.1–61.6	10.4	4.6–16.1	118.0	86.0–150
Pb	29.4	13.6–47.5	25.7	23.0–27.7	41.5	38.6–44.3	12.6	11.7–13.5
Cr	84.3	18.1–199	183	152–233	30.2	29.9–30.5	180	107–254
Cu	19.4	5.5–45.6	17.1	15.2–18.9	23.2	21.8–24.5	47.0	40.7–53.3
Co	9.2	4.6–18.8	13.0	7.0–25.0	16.3	14.5–18.1	25.2	23.0–27.3
B	36.9	10.6–67.1	18.4	4.5–29.1	–	–	–	–
Mn	526	108–1230	260	85.0–452	–	–	–	–
Be	1.3	0.1–2.6	1.2	0.6–1.9	–	–	–	–
Ba	557	135–1030	59.6	–	–	–	–	–
Sr	1250	153–2310	381	158–604	–	–	–	–
V	48.9	34.1–66.6	72.7	25.8–120	–	–	–	–
Hg	0.02	<0.01–0.05	0.01	0.01–0.01	0.09	0.07–1.12	0.05	0.04–0.05

Примечание. В графе 1 – средние содержания, 2 – диапазон варьирования содержания.

ка и меди в 2–4 раза больше, чем в среднем почвы мира, хрома – в 2–5 раз, кобальта – в 4 раза, бора – в 2–7 раз, ванадия – в 2 раза. Органо-известковые сапропели обогащены в 3 раза больше, чем в среднем почвы мира, молибденом, в 1–5 раза больше цинком, в 1.5–3.0 раза хромом, в 2 раза бором, в 1.5–2.0 раза марганцем. Известковые са-

пропели, наиболее ценные для нейтрализации почвенной кислотности, содержат хром в 1.5–2 раза больше, чем почвы мира, бор – в 1.3–5.0 раза, барий – в 2 раза, стронций – в 7–10 раз. В связи с этим можно сделать вывод, что сапропели могут служить источником обогащения почв микроэлементами.

Таблица 2. Средние содержания микроэлементов в сапропелях и диапазон их изменений в сравнении с кларками литосферы и почв мира, мг/кг абсолютно-сухого вещества

Элемент	Кларки литосферы	Кларки почв мира (Русской равнины)		Содержание в сапропелях	
		Виноградов	Kabata-Pendias	среднее	диапазон
Кадмий	0.13	0.5	0.5	0.5	0.06–1.3
Молибден	1.1	2.0	2.0	2.1	0.5–12.4
Никель	58.0	40.0	20.0	40.0	5.1–106
Цинк	83.0	50.0 (до 90.0)	61.0	93.4	12.3–215
Свинец	16.0	10 (2.6–43.0)	25.0	17.7	5.6–43.0
Хром	83.0	70.0	65.0	123	25.7–260
Медь	47.0	20.0	23.0	34.5	5.5–100.8
Кобальт	18.0	8 (1.0–15.0)	8.5	13.8	2.3–38.0
Бор	12.0	10 (50.0)	30.0	33.6	6.9–94.1
Марганец	1000.0	850.0	–	549	108–1580
Бериллий	3.8	6.0	–	1.4	0.4–2.8
Барий	650.0	500.0	–	356	44.7–1030
Стронций	340.0	300.0	210.0	333	26.5–1770
Ванадий	90.0	100.0	90.0	79.2	20.3–215
Ртуть	0.08	1.0	0.14	0.04	0.01–0.3

Наибольший интерес по составу микроэлементов, в том числе биофильных (Mo, B, Co) [8], представляют органические и органо-минеральные сапропели, содержащие от 35 до 85% органического вещества. Причем эти элементы находятся в них в наиболее благоприятных для живых организмов сочетаниях и количествах, поскольку органика сапропелей образована перегнивающими растительными и животными остатками. Кроме того, органическое вещество может сорбировать микроэлементы и образовывать с ними органо-минеральные соединения, которые усваиваются значительно лучше, чем минеральные соли тех же элементов.

По нашим данным, в отложениях оз. Черное в Московской обл. коэффициент корреляции содержания молибдена валового с наличием цианобактерий очень высок ($r = 0.428$ для объема выборки $n = 97$). Довольно высок коэффициент корреляции содержания бора валового с наличием цианобактерий и диатомовых водорослей в отложениях оз. Белое в Московской обл. (соответственно $r = 0.367$ и 0.349 для объема выборки $n = 67$). Максимальное содержание меди и цинка в этих озерах найдено в некоторых разновозрастных слоях сапропелевых отложений. В накоплении этих микроэлементов основная роль, очевидно, принадлежит физико-химическим факторам, т.к. коэффициенты корреляции их содержания с биологическими показателями низкие. Известно,

что цинк и медь могут осаждаться на щелочном и сероводородном барьерах. С первым, скорее всего, связан максимум цинка в атлантических слоях оз. Черное, со вторым – максимум содержания меди и цинка в суббореальных отложениях оз. Белое. С помощью метода комплексного биологического (экологического) анализа установлено, что в атлантическое время (5000–8000 лет назад) в оз. Черное стали обильно поступать грунтовые воды, богатые кальцием. Эти воды и известковистые осадки, образующиеся на дне, создали щелочной барьер для осаждения цинка. В суббореальное время (2500–5000 лет назад) в оз. Белое в связи с потеплением климата и повышением его сухости снизился уровень озера, усилился процесс перегнивания органических остатков, создались резко восстановительные условия у дна, возросло количество сероводорода в иловых отложениях и в воде. На этом сероводородном барьере происходило накопление цинка и меди.

Повышение содержания меди и цинка в верхних слоях субатлантических отложений оз. Черного может быть связано с образованием внутри-комплексных нерастворимых соединений гуминовых кислот с медью, с сорбцией меди и цинка гумусовыми веществами и гидроокислами железа и марганца [8]. По нашим данным, в этот промежуток времени вокруг озера сформировалось низинное болото, и в озеро поступали богатые гуму-

Таблица 3. Требования к сапропелям на удобрение по содержанию тяжелых металлов, мг/кг абсолютно-сухого вещества

Элемент	Российская Федерация. ГОСТ Р 54000-2010		Евросоюз. Regulations № 354/2014
	1-й класс пригодности	2-й класс пригодности	
Кадмий	3	3–9	<0.7
Молибден	20	20–200	–
Никель	50	50–200	<25
Цинк	300	300–600	<200
Свинец	50	50–150	<45
Хром	100	100–260	<70
Медь	100	100–300	<70
Кобальт	20	20–60	–
Марганец	500	500–1500	–
Ртуть	1	1–6	<0.4

совыми веществами, железом и марганцем болотные воды.

Безусловно содержание ядовитых кадмия, ртути и возможно бериллия во всех видах сапропелей находится либо на уровне кларков, либо меньше их. Количество ядовитого свинца в органических и органо-силикатных сапропелях может достигать 21.7 мг/кг, в органо-известковых и известковых сапропелях – до 27.2 и 47.5 мг/кг соответственно. В нейтральной и щелочной средах свинец инертен в результате образования труднорастворимых фосфатов, карбонатов, гидроокислов, поглощения органическими и минеральными коллоидами, и только при pH < 5.5 может стать токсичным.

Скорость образования сапропелей в озерах, как правило, очень невысокая. Например, в оз. Галичское в Костромской обл., по нашим данным, за последние 4900 лет скорость осадконакопления составляла 0.3–0.4 мм в год. Учитывая, что мощность сапропелевых отложений может достигать от нескольких до 20 и более метров, загрязнение илов в результате хозяйственной деятельности человека, ставшей интенсивной лишь в последние 100, максимум – 200 лет, затрагивает только самые поверхностные слои отложений. Поэтому сапропели практически на всю глубину сапропелевой залежи – экологически чистый природный продукт.

В табл. 3 приведены требования к сапропелевым удобрениям по ГОСТ Р 54000-2010 РФ [9] и требования Евросоюза по Regulations №№ 54/2014 [10]. Показано, что естественные сапропели по содержанию всех нормируемых ТМ не выходят за пределы требований ГОСТ Р 54000-2010 даже с учетом их максимального содержания в сапропелях. Требования Евросоюза более жест-

кие. Для содержания никеля и хрома они представляются трудно достижимыми, т.к. предусматривают содержания этих элементов меньше кларковых. Связана эта жесткость с высоким уровнем техногенного загрязнения почв Евросоюза.

При применении сапропелевых удобрений следует учитывать региональные и локальные кларковые содержания ТМ в почвах, которые могут значительно отличаться от общемировых. Например, Белорусское Полесье, Мещерская низина Подмосковья и другие южно-таежные ландшафты (антропогенно не загрязненные) чрезвычайно бедны йодом, медью, бором, молибденом [8]. С другой стороны, высокие темпы загрязнения биосферы в последние десятилетия привели к возрастанию концентраций большинства микроэлементов в почвах европейской части юга России, к техногенной трансформации кларков почв этого региона [11]. Поэтому суммарное (совместно с фоновым) содержание тех или иных микроэлементов при внесении сапропелей в почву не должно превышать предельно допустимых норм для почв.

Следует отметить, что содержание валовых форм микроэлементов в удобрениях или в почвах отражает потенциальную возможность ингибирующего или стимулирующего воздействия их на растение. При применении сапропелей на удобрение необходимо учитывать, что доступны главным образом подвижные формы микроэлементов, и что их подвижность зависит от окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условий, связанных с содержанием в окружающей среде кислорода, углекислоты, сероводорода, органических кислот и других продуктов минерализации органических веществ. Степенью подвижности в

значительной степени можно управлять с помощью известных агротехнических и агрохимических приемов – известкования, внесения органических удобрений, природных адсорбентов (бентонитовых глин, диатомитов, цеолитов и др.), с помощью фитомелиорантов [2].

ВЫВОДЫ

1. Сапропели – перспективный природный материал для органического земледелия. С его помощью можно восполнить дефицит жизненно-важных микроэлементов в почвах (Mo, Ni, Zn, Cr, Cu, Co, B, Mn, V), содержание валовых форм которых может быть в 2–7 раз больше кларковых для почв.

2. Содержание тяжелых металлов в естественных сапропелях всех видов, пригодных для удобрения сельскохозяйственных культур, находится в пределах норм, допустимых для сапропелевых удобрений по ГОСТ Р 54000–2010.

3. Накопление микроэлементов в сапропелях связано с составом организмов-сапропелеобразователей, с геохимическими и биогеохимическими барьерами, возникающими в озерах на разных этапах их существования, с поглощением микроэлементов органическим веществом сапропелей.

4. При использовании сапропелей на удобрение следует учитывать фоновые содержания мик-

роэлементов в почвах и степень их подвижности в конкретных условиях применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довбан К.И. Переход от традиционного к биоорганическому земледелию в республике Беларусь. Минск: Беларуская наука, 2016. 90 с.
2. Аристархов А.Н. Оптимизация питания растений и применение удобрений в агросистемах. М.: ЦИНАО, 2000. 524 с.
3. Инструкция по разведке озерных месторождений сапропеля РСФСР. М.: Мингео СССР, Торфгеология, 1988. 96 с.
4. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
5. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Florida: CRC Press, Boca Batons, 1984. 336 p.
6. Васильев А.А., Романова А.В. Железо и тяжелые металлы в аллювиальных почвах Среднего Приуралья. Монография. Пермь, “ПрокростЪ”, 2014. 232 с.
7. Почвоведение. М.: Колос, 1975. 496 с.
8. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М., 1975. 496 с.
9. ГОСТ Р 54000-2010. Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия.
10. Regulations № 354/2014. Official Journal of the European Union.
11. Дьяченко В.В., Матасова В.Ю. Региональные кларки химических элементов в почвах европейской части юга России. М.: Почвоведение. 2016. № 10. С. 1159–1166.

Trace Elements in Sapropel – Natural Fertilizer Material for Organic Farming

O. N. Uspenskaya^{a,b,#} and I. Yu. Vasyuchkov^{a,##}

^a All-Russian Research Institute of Vegetable Growing – Branch of “Federal scientific Center of Vegetable Growing” Vereya, build. 500, Ramensky district, Moscow region 140153, Russia

^b Institute of Wound Forestry
Uspenskoye, Odintsovo district, Moscow region 143030, Russia

[#] E-mail: usp-olga@yandex.ru

^{##} E-mail: gamov_igor@mail.ru

The content of 15 microelements, including heavy metals, was determined for 8 types of sapropel for fertilizer taken from sapropel deposits of 15 regions of the Russian Federation. It has been shown that sapropel is a promising natural material for organic farming, with which it is possible to compensate for the deficit of vital trace elements in soils. Their content in sapropel can be 2–7 times higher than the Clarke value for the soils of the world. The content of heavy metals in natural sapropel of all kinds is within the limits allowed for sapropel fertilizers according to GOST R 54000–2010.

Key words: organic farming, sapropel, microelements, heavy metals.