

УДК 631.416:631.417.2:633.282

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-АГРОХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРОЦЕНОЗА С МНОГОЛЕТНИМ ВЫРАЩИВАНИЕМ МИСКАНТУСА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ<sup>1</sup>

© 2020 г. С. Ю. Капустянчик<sup>1</sup>, Н. В. Бурмакина<sup>1</sup>, В. Н. Якименко<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт цитологии и генетики СО РАН  
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 10, Россия

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

\*E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 20.01.2020 г.

После доработки 07.02.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

В длительных полевых исследованиях показана возможность бесменного выращивания мискантуса в течение не менее 15 лет на низкоплодородных почвах в гидротермических условиях земледельческой зоны Западной Сибири. Содержание в надземной биомассе мискантуса в фазе уборки 53% целлюлозы делает его перспективным сырьем для переработки; в начале вегетации зеленую массу можно использовать на кормовые цели. Установлено, что многолетние посадки мискантуса при среднегодовой урожайности 12 т сухого вещества/га, оказывали положительное средообразующее воздействие на агроценоз. Выявлено увеличение на 0.3–0.4% содержания гумуса в почве под 10-летней плантацией мискантуса; отмечена тенденция накопления подвижных форм зольных элементов в верхнем почвенном слое.

*Ключевые слова:* мискантус, агроценоз, урожайность, почва, агрохимические свойства.

**DOI:** 10.31857/S0002188120090082

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость эффективного преодоления современных экологических и экономических вызовов предполагает в числе прочих мер активный поиск возможностей всевозрастающего освоения возобновляемых источников сырья и энергии. На этом пути перспективным направлением является использование продукции растениеводства — биомассы культур с высокими темпами фотосинтетической деятельности. Одну из таких культур — мискантус — достаточно интенсивно возделывают в странах Западной Европы, США, Китае, Индии и др. для получения лигноцеллюлозной биомассы и производных продуктов с высокой добавленной стоимостью [1–3]. Повышенная холодоустойчивость некоторых видов мискантуса делает его перспективным кандидатом для интродукции в континентальные районы России. Однако широкое распространение мискантуса в нашей стране вообще, и в Сибири, в

частности, сдерживается недостаточной проработанностью элементов технологии возделывания этой культуры в региональных почвенно-климатических условиях. Имеющиеся литературные данные получены, главным образом, в регионах (странах), существенно отличающихся от Западной Сибири по климату и гидротермическому режиму почв; экстраполяция результатов таких исследований на почвенно-климатические условия сибирского региона не всегда оправдана.

Проведенные в ряде стран исследования показали, что важной особенностью мискантуса является способность его производственных плантаций произрастать на одном месте в течение более 20 лет без существенного снижения продуктивности, высокая интенсивность которой обусловлена специфической организацией фотосинтетической деятельности растения по C4-типу. Особое внимание заслуживает способность этой культуры длительное время произрастать на низкопродуктивных землях, обеспечивая более высокую экономическую отдачу использования данных угодий [4–7].

<sup>1</sup> Работа поддержана бюджетным проектом ИЦиГ СО РАН № 0324-2019-0039-С-01 и проектом ИПА СО РАН № 0313-2017-0003.

**Таблица 1.** Некоторые характеристики целинных почв исследованной территории (слой 0–20 см) [8]

Почва	Физическая глина, %	Гумус, %	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Подвижные, мг/кг		Обменный Mg, мг/кг
				P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
Дерново-подзолистая	16.0	2.3	5.6	207	148	165
Серая лесная	18.1	2.6	6.1	172	80	110

Вопросы экологической адаптивности мискантуса к сибирским почвенно-климатическим условиям, его влияния на почву и другие компоненты ландшафта на сегодняшний день остаются нерешенными. В этой связи проведение в Сибири исследований средообразующих последствий длительного выращивания мискантуса, мониторинг почвенно-экологического состояния и продуктивности агроценозов этой культуры в процессе их формирования и функционирования имеют большое значение и актуальность.

Цель работы – в стационарных полевых опытах в земледельческой зоне Западной Сибири оценить урожайность и качество продукции мискантуса, а также его влияние на агрохимические свойства почвы при многолетнем бессменном выращивании.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования с разновозрастными посадками мискантуса проводят с 2005 г. по настоящее время на полях экспериментального хозяйства ИЦиГ СО РАН, расположенного в Новосибирском р-не, Новосибирской обл. Почвенный покров территории, на которой в 1970-х гг. было организовано данное хозяйство, представлен серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами. Небольшие участки этих почв в естественном, целинном состоянии в настоящее время сохранились по опушкам окружающих поля сосново-березовых и березовых лесов; некоторые их характеристики представлены в табл. 1.

Проведенное в преддверии закладки опытов с мискантусом почвенно-агрохимическое обследование хозяйства показало [8], что длительное сельскохозяйственное использование данных почв привело к существенному истощению их плодородия. Например, содержание гумуса за время эксплуатации почв уменьшилось с 2.3–2.6 до 1.1%, за эти годы, вероятно, была израсходована не только легкоминерализуемая фракция гумусного фонда, но и часть его инертной компоненты.

Климат исследованной территории – среднеконтинентальный, умеренно холодный, умерен-

но засушливый. Гидротермические условия лет исследования были довольно контрастными. Сумма осадков за май–август варьировала от 110 до 364 мм (среднемноголетняя норма – 214 мм), сумма среднесуточных температур за этот период изменялась от 1759 до 2234°C (среднемноголетняя норма – 1952°C). Условия увлажнения вегетационных периодов, определяемые по гидротермическому коэффициенту Селянинова, складывались следующим образом: 2012 г. был сухим, 2010 и 2011 гг. – засушливыми, 2008 и 2016 гг. – недостаточно увлажненными, 2005–2007, 2009, 2014, 2017–2019 гг. – достаточно увлажненными, 2013 г. – избыточно увлажненным.

В опытах выращивали *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский, выведенный ИЦиГ СО РАН и внесенный в Государственный реестр селекционных достижений (свидетельство № 58540).

Род Мискантус (*Miscanthus*) принадлежит к подсемейству Просовых (Panicoideae) семейства Злаки (Poaceae). *M. sacchariflorus* относится к длиннокорневищным травам высотой до 2.0–2.5 м, имеет прямой, жесткий стебель, листья длиной до 60 см характеризуются узкой ланцетно-линейной формой. Соцветие длиной до 25 см представляет собой веерообразную метелку бледно-фиолетового цвета в начале цветения и бело-серого при его завершении. Морфологическое строение подземной части растений *M. sacchariflorus* представлено мочковатой корневой системой с множеством придаточных корней, узлом кущения и видоизмененным побегом – корневищем. Узел кущения и подземные побеги располагаются на глубине 5–20 см от поверхности почвы. Корни размещаются в слое почвы на глубине от нескольких сантиметров до 1.5 м. Корневища толщиной 4–7 мм имеют округлую или сплюснутую форму.

Фенологические особенности *M. sacchariflorus* на территории Западной Сибири заключаются в следующем: отрастание побегов начинается поздней весной (начало мая), цветение наступает в конце августа, к концу сентября происходит высыхание и отмирание надземной биомассы, связанное с понижением среднесуточной температуры и первыми заморозками. В целом для *M. sacchariflorus* характерен полный фенологический

цикл развития независимо от погодных условий – всходы (отрастание), начало роста междоузлий, кушение, флаговый лист, цветение, отмирание.

В условиях сибирского региона мискантус размножается исключительно вегетативным способом. В наших опытах корневища высаживали в мае с помощью переоборудованной картофелепосадочной машины СН-4Б (посадочная норма 1.4 т/га) в борозды глубиной 20–25 см, расстояние между бороздами 70 см, далее борозды засыпали, поверхность выравнивали и прикатывали. В год посадки происходило усиленное формирование корневой системы растений и в меньшей степени – надземной биомассы. На 2–3-й год образовывалась ровная плантация растений высотой до 2.5 м. Мискантус убирали сплошным скашиванием (трактор МТЗ-82 с косилкой КИР-1.5) обычно в начале октября, при появлении заморозков и высушении надземной биомассы, урожай учитывали выборочно с помощью рамки 1 м<sup>2</sup> в четырех–шестикратной повторности.

Рассматриваемые опыты представляют собой разновозрастные плантации мискантуса, расположенные на прилегающих участках серых лесных и дерново-подзолистых почв с близкими агрохимическими свойствами; в опытах изучали урожайность и качество продукции мискантуса в зависимости от возраста посадки. Изменение почвенных показателей при многолетнем выращивании мискантуса рассмотрено в полевом опыте, заложенном в 2009 г. на типичном участке старопахотной серой лесной почвы. Данный опыт (как и другие) представляет собой поле площадью ≈1 га, на котором участки с мискантусом (полосы 50 × 20 м) чередуются с такими же участками бессменного пара, служившего в качестве контроля. В связи с необходимостью выявления средообразующих возможностей мискантуса, удобрения в опыте не применяли.

Почвенные образцы отбирали во время уборки урожая и анализировали общепринятыми методами [9, 10]: гумус определяли по Тюрину, рН-потенциометрическим методом, нитратный азот – методом ионометрии, подвижный фосфор и калий – по Чирикову, легкоподвижный фосфор – по Францесону, степень подвижности фосфатов – по Карпинскому–Замятиной, обменные калий и магний – в вытяжке 1 М раствора CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>. Растительные образцы отбирали в течение вегетации и анализировали стандартными методами [11].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После высадки мискантуса при закладке опыта, в первый год формирования плантации про-

**Таблица 2.** Продуктивность мискантуса (посадка 2015 г.)

Год определения	Биомасса, т абсолютно сухого вещества/га	
	надземная	подземная
2015	0.8 ± 0.2	2.6 ± 0.4
2016	8.1 ± 2.1	4.0 ± 0.9
2017	10.7 ± 2.2	8.9 ± 1.4

исходило прежде всего интенсивное ветвление корневищ и их рост [12], поэтому продуктивность подземной биомассы была значительно больше надземной (табл. 2). Исследования показали, что усиленный рост подземных побегов начинался в начале фазы кушения растений, к окончанию фазы цветения мискантуса его корневища уже образовывали многочисленные боковые побеги и новые метамеры. Интенсивное нарастание надземной биомассы начиналось с середины июня, к концу первого года вегетации прирост обычно составлял 0.8–1.0 т/га.

Во 2–3-й год опыта происходило активное нарастание как надземной, так и подземной биомассы, урожайность культуры достигала 10–12 т/га. Сформировавшаяся мощная корневая система обусловила высокий потенциал вегетативного размножения и интенсивности продукционного процесса фитоценоза.

Следует сказать, что определенную дискуссионность может вызвать вопрос об инвазивности мискантуса. В целом известно, что инвазивность присуща прежде всего видам, размножающимся семенами. В этой связи, по мнению ряда авторов, мискантус не представляет угрозы для сельскохозяйственных угодий [13, 14]. Изучаемый вид не дает семян в условиях Сибири, тем самым минимизируя риск инвазивного распространения. Возможное распространение корневищ по окружающей территории ограничивается агротехническими приемами, как и для других подобных культур – проведением опашки поля по периметру 1–2 раза в течение вегетационного периода. Отметим, что проводимые с 2005 г. исследования не выявили инвазивности мискантуса на опытных участках и соседних полях.

Проведенная в 2018 г. сравнительная оценка продуктивности разновозрастных посадок мискантуса свидетельствовала об отсутствии существенных различий урожайности культуры в зависимости от возраста плантации, по крайней мере, в течение 10–15 лет ее функционирования (табл. 3). Отметим, что довольно стабильная урожайность мискантуса была получена в годы с раз-

**Таблица 3.** Характеристика надземной фитомассы разновозрастных посадок мискантуса (средние, 2018 г.)

Год посадки	Высота растений, см	Густота стеблестоя, шт./м <sup>2</sup>	Продуктивность, т/га	Влажность	Зольность
				%	
2005	194	223	12.4 ± 2.5	20.7	7.20
2009	200	302	14.3 ± 2.2	21.8	6.95
2016	211	202	10.8 ± 2.2	23.0	5.39

**Таблица 4.** Содержание органических соединений в надземной биомассе мискантуса (посадка 2009 г.), % от абсолютно сухого вещества

Год отбора образцов	Целлюлоза	Лигнин	Пентозаны	Жировосковая фракция
2016	52.6 ± 1	24.1 ± 0.5	23.1 ± 0.5	2.5 ± 0.1
2017	52.9 ± 1	24.5 ± 0.5	22.0 ± 0.5	2.1 ± 0.1
2018	50.4 ± 1	23.2 ± 0.5	22.1 ± 0.5	1.6 ± 0.1
2019	51.3 ± 1	23.9 ± 0.5	21.9 ± 0.5	2.0 ± 0.1

личными погодными условиями вегетационного периода, что свидетельствовало о высокой адаптивности растения к факторам внешней среды.

Структурный анализ надземной биомассы показал, что различия между разновозрастными плантациями мискантуса в целом были невелики. Варьирование продуктивности составило от 10.8 (посадка 2016 г.) до 14.3 т/га (посадка 2009 г.). Самый высокий стеблестой отмечен в посадках 2016 г. при минимальной его густоте в 202 шт./м<sup>2</sup>, самый низкий — в посадках 2005 г. при средней густоте стояния 223 шт./м<sup>2</sup>. Наивысшая продуктивность мискантуса 2009 г. посадки в значительной степени была сопряжена с соответствующей максимальной густотой стеблестоя — 302 шт./м<sup>2</sup>.

Потенциальная продуктивность мискантуса достигает 40 т сухой массы/га, реальная — зависит от почвенно-гидротермических условий выращивания и вида растения. По усредненным данным [15], урожайность 3-летних посадок мискантуса в условиях Англии составляла: у *Miscanthus giganteus* — 13.8–18.7, *M. sacchariflorus* — 11–12, *M. sinensis* — 4.6–10.9 т/га, в Германии — 22.8–29.1, 12–13 и 9.1–12.8 т/га, в Португалии — 34.7–37.8, 35–36 и 16.1–22.4 т/га соответственно.

В наших опытах на юге Западной Сибири (на территории Новосибирской обл.) продуктивность разновозрастных посадок *M. sacchariflorus* обычно варьировала в пределах 10–16 т/га, при среднем показателе ≈ 12 т. Сопутствующие внешние факторы роста и развития растений — приход фотосинтетической активной радиации, продол-

жительность вегетационного периода и его погодные условия — позволяли получать соответствующую урожайность культуры.

Отметим, что в ИЦиГ СО РАН проводят изучение и других дикорастущих и культурных энергетических растений, в т.ч. из семейства злаковых, например, канареечник тростниковидный (*Phalaroides arundinaceae* Raush) — урожай зеленой массы равен 30–35 т/га, содержание целлюлозы — 44.2% (абсолютно сухого сырья — а.с.с.), высота побегов — 220 см, овсяница тростниковидная (*Festuka arundinaceae* Schreb) — урожай зеленой массы равен 39–45 т/га, содержание целлюлозы — 40% (а.с.с.), высота побегов — 158 см, ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) — урожай зеленой массы равен 33–38 т/га, содержание целлюлозы — 55.4% (а.с.с.), высота побегов — 150 см. Однако по комплексу биологических, хозяйственных и биохимических показателей мискантус представляется наиболее перспективным.

Химический анализ надземной биомассы мискантуса (табл. 4) подтвердил его ценность как источника энергии и сырья для переработки, прежде всего в целлюлозно-бумажной промышленности, производстве биоразлагаемых упаковочных материалов, а также других отраслях [16]. Высокое содержание целлюлозы (53%) при относительно низком уровне лигнина и жировосковой фракции характеризует мискантус как перспективную урожайную сырьевую культуру со значительным экономическим потенциалом возделывания и переработки.

**Таблица 5.** Качество корма и питательная ценность зеленой массы мискантуса 3-го года посадки в разные фазы вегетации (средние)

Фаза вегетации	Влажность, %	Химический состав, % сухого вещества				Питательная ценность 1 кг корма	
		протеин	жир	клетчатка	зола	к.е.	ОЭ, МДж/кг
Весеннее отрастание (начало июня)	77.4	19.8	2.0	27.1	11.4	0.86	10.2
Наращение листьев (конец июня)	63.9	12.1	2.2	28.9	6.5	0.78	9.27
Флаговый лист (сере- дина августа)	46.3	6.9	1.0	41.5	5.5	0.61	8.51

Проведенное исследование кормовых качеств мискантуса [17] показало их снижение в течение вегетационного периода (табл. 5). По мере прохождения фенофаз в надземной биомассе уменьшалось количество протеина и жира и увеличивалось содержание клетчатки. Установлено, что ее содержание в растениях мискантуса для рациона крупного рогатого скота является благоприятным лишь при укосе до конца июня. Напомним, что оптимальное содержание клетчатки в кормах для КРС составляет 22–27, для свиней – 5–7, птицы – 4–6%. При чрезмерно высоком содержании клетчатки существенно уменьшается перевариваемость питательных веществ рациона.

Содержание обменной энергии (ОЭ) 9–10 МДж/кг в начале вегетации также свидетельствовало о возможности получения в этот период корма с довольно хорошим качеством. К концу вегетации содержание клетчатки в растениях заметно превышало оптимальные показатели, рекомендуемые для рациона животных; это обстоятельство существенно снижает кормовые качества данной культуры. Однако именно высокое содержание целлюлозы и возможность ее переработки в ценные продукты является существенным достоинством мискантуса.

Результаты опытов свидетельствовали, что содержание элементов-биофилов в растениях разновозрастных посадок мискантуса в период уборки в среднем составило: азота – 0.19, фосфора – 0.16, калия – 0.46, магния – 0.034% от сухого вещества. Следовательно, с каждой 1 т скашиваемого мискантуса из почвы отчуждалось  $\approx 1.5$  кг азота, 1.3 – фосфора, 3.5 – калия и 0.3 кг – магния. Учитывая, что средняя урожайность мискантуса в наших опытах равнялась 12 т/га, ежегодный вынос элементов питания растений за счет почвенных запасов составлял: азота – 17–20, фосфора – 11–17, калия – 35–40, магния – 2–3 кг/га.

По сравнению с другими урожайными культурами, такие масштабы отчуждения мискантусом питательных элементов из почвы представляются невысокими.

Исследованные почвы в естественном состоянии обладают невысоким в целом уровнем плодородия (табл. 1), при их длительном сельскохозяйственном использовании в годы перед закладкой рассматриваемых опытов почвенное плодородие было существенно истощено. Выращивание мискантуса в течение 10 лет способствовало значительному повышению содержания гумуса в почве агроценоза (табл. 6), как по сравнению с исходной старопахотной почвой, так и соседним парующимся участком. Отметим, что количество гумуса в почве под мискантусом возросло не только в верхнем, но и в нижележащих почвенных слоях. Можно предположить, что легкий гранулометрический состав исследованной почвы сдерживал процесс гумусонакопления, в тяжелых почвах он проходил бы намного интенсивнее. Ранее в научной печати сообщали об обеспечении посадками мискантуса положительного баланса гумуса в агроценозах [5, 6, 18].

В сибирских условиях наиболее информативным показателем обеспеченности выращиваемых культур почвенным азотом является содержание нитратов [19]. Содержание нитратного азота в почве опытов осенью 2019 г. показано в табл. 6. Низкие запасы органического вещества в почве существенно лимитировали процессы минерализации и нитратообразования, тем не менее, в верхнем слое почвы пара накапливалось 12–13 мг N-NO<sub>3</sub>/кг. Увеличившиеся запасы почвенного органического вещества под посадкой мискантуса в течение вегетации обеспечивали, вероятно, более высокую эффективность процессов нитрификации. В то же время интенсивный рост биомассы мискантуса обуславливал практически

**Таблица 6.** Агрохимические свойства почвы опыта с мискантусом (2019 г.), (посадка 2009 г.)

Слой почвы, см	Мискантус				Пар			
	Гумус, %	N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	K <sub>обм</sub>	Mg <sub>обм</sub>	Гумус, %	N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	K <sub>обм</sub>	Mg <sub>обм</sub>
			мг/100 г				мг/100 г	
0–20	1.37	0.8	3.9	3.6	0.96	12.4	6.0	3.1
20–40	1.08	0.8	2.7	3.1	0.79	5.9	2.4	3.0
40–60	0.53	0.7	2.2	3.1	0.41	2.5	2.1	2.5
60–80	0.37	0.6	4.8	8.2	0.23	2.2	4.3	8.2
80–100	0.31	0.5	6.9	15.1	0.21	2.2	6.6	15.1
HCP <sub>05</sub>	0.15	0.1	0.4	0.8	0.11	1.5	0.7	0.6

полное потребление растениями имеющихся запасов подвижного минерального азота по всему почвенному профилю. В этой связи представляется целесообразной оптимизация азотного режима данной почвы. Однако в подобных экстенсивных агроценозах (без внесения удобрений) дополнительное положительное влияние на фонд минерального азота будет оказывать гумусное состояние почв, перманентно улучшающееся при выращивании мискантуса.

По данным зарубежных исследователей [20, 21], азотные удобрения необходимы в основном на почвах с низким содержанием N, при достаточно интенсивных и эффективных процессах минерализации почвенного органического вещества влияния N-удобрений на урожайность мискантуса не наблюдали, по крайней мере со 2–3-го года вегетации. Однако для поддержки корневищ при закладке плантации целесообразно внесение азотных удобрений в дозе N60.

Слабая отзывчивость мискантуса на внесение удобрений во многом связана с его способностью к эффективной реутилизации питательных элементов. В конце вегетации из побегов в корневища перемещается примерно 50% поглощенного азота и фосфора и 30% калия и магния [20]. Весной эти резервы мобилизуются для роста новых побегов, делая мискантус в определенной степени независимым от уровня почвенного плодородия. Низкую потребность мискантуса в почвенных запасах элементов питания ранее отмечали ряд авторов [5, 6, 15].

Обеспеченность зерновых (злаковых) культур обменным калием на исследованной почве легкого гранулометрического состава по нашим грациям [22, 23] является неустойчивой, т.е. для них (в отличие от картофеля) калий не находится в первом минимуме и внесение других макроэлементов, в первую очередь, азота, существенно повышает урожайность. Известна способность рас-

тений семейства злаковых усваивать труднодоступный калий из кристаллической решетки алюмосиликатов. В длительных исследованиях Ротамстедской опытной станции (Великобритания) на легких почвах, в которые более 80-ти лет не вносили калийные удобрения, зерновые культуры, выращиваемые все это время, могли ежегодно усваивать 15–25 кг K<sub>2</sub>O/га [24].

Выращивание в течение 10 лет мискантуса в наших опытах сопровождалось достоверным снижением содержания обменного калия в верхнем почвенном слое относительно почвы пара (табл. 6), ниже по профилю уровень калия практически не изменился. Это подтверждает результаты проведенных ранее длительных исследований [22, 25], свидетельствующих, что значимые изменения содержания подвижных форм калия и при дефицитном, и при профицитном его балансе в агроценозах, проявляются, главным образом, в верхнем (пахотном) слое почв. Ежегодный вынос калия отчуждаемой биомассой мискантуса (до 40 кг/га) обеспечивался за счет структурного калия почвенных минералов, не извлекающегося стандартными вытяжками.

Содержание обменного магния в почве за 10 лет опытов не изменилось, и было одинаковым и под мискантусом, и при длительном паровании (табл. 6). Это связано с невысоким его содержанием в урожае культуры и эффективной реутилизацией. Ранее было показано [25], что снижение содержания подвижных форм магния в почве при ее сельскохозяйственном использовании связано не столько с потреблением выращиваемыми культурами (вынос урожаем), сколько (главным образом) с процессами выщелачивания элемента из верхних почвенных слоев, значительно усиливающимися при внесении минеральных удобрений, прежде всего аммонийных азотных и калийных, ионы аммония и в меньшей степени калия

**Таблица 7.** Содержание форм фосфора в почве опыта с мискантусом (2019 г.), (посадка 2009 г.), мг/кг

Слой почвы, см	Мискантус			Пар		
	по Чирикову	по Францесону	по Карпинскому	по Чирикову	по Францесону	по Карпинскому
0–20	292	12.6	5.53	306	10.6	6.23
20–40	266	11.9	1.45	283	10.3	1.68
40–60	289	14.7	0.21	321	13.9	0.52
60–80	349	17.6	0.14	356	16.3	0.21
80–100	265	7.0	0.10	280	6.0	0.15
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	31	1.3	0.52	24	1.4	0.51

эффективно вытесняют магний из почвенного поглощающего комплекса.

Реакция почвенного раствора при длительном выращивании мискантуса не изменилась по сравнению как с исходной старопахотной почвой, так и с почвой сопутствующего пара,  $pH_{H_2O}$  во всех случаях был равен 5.75.

Специфической особенностью исследованных почв является довольно высокое содержание подвижного фосфора как в естественном состоянии ( $\approx 200$  мг/кг), так и старопахотном. В целом для региона характерно богатство почвообразующих пород апатитами и фосфоритами и преобладание в фосфорном фонде почв высокоосновных фосфатов кальция и их оклюдированных форм. В связи с этим при повышенном содержании валового фосфора в почвах доступность его запасов обычно низкая [26, 27].

Содержание подвижного фосфора (по Чирикову) в почве опыта (табл. 7) было примерно одинаковым и под посевом мискантуса и в паровом поле, при довольно равномерном распределении его по всему почвенному профилю с некоторым увеличением в иллювиальном горизонте. По действующим стандартным грациям такое содержание соответствует очень высокой обеспеченности почвы фосфором. Однако по данным [26, 27], концентрация почвенного фосфора, определенная по методу Чирикова, на 74% обусловлена содержанием в почве высокоосновных фосфатов кальция и слабо отражает обеспеченность фосфором выращиваемых культур.

По мнению [28], наиболее чувствительным способом оценки фосфорного состояния западносибирских почв является метод Францесона. Содержание легкоподвижного фосфора в почве нашего опыта по грациям [28] соответствовало средней степени обеспеченности растений фосфором. Распределение этой формы фосфатов по почвенному профилю в целом аналогично по-

движному фосфору, с пиком в иллювиальном горизонте и дальнейшим резким снижением. Обращает на себя внимание факт заметного повышения содержания легкообменного фосфора в верхнем слое почвы под мискантусом по сравнению с паром и явная тенденция к соответствующему его увеличению в нижележащих почвенных слоях. Причиной этого явления могла быть как более интенсивная фиксация фосфора в труднодоступные формы в условиях парующейся почвы, так и его определенная биогенная аккумуляция в верхних почвенных горизонтах под многолетней посадкой мискантуса, сопровождавшаяся, возможно, некоторым повышением степени мобильности имевшихся почвенных фракций фосфатов.

Важным показателем способности твердой фазы почвы отдавать в раствор ионы фосфора является степень их подвижности, определяемая по методу Карпинского–Замятиной. В табл. 7 показаны результаты анализа почвы опыта, выполненные данным способом (пересчитанные из мг/л в мг/кг почвы). Этот показатель фосфорного состояния почвы, в отличие от других рассмотренных форм элемента, имел максимальную величину в верхнем почвенном горизонте и резко снижался с глубиной, отражая как высокую обеспеченность растений доступным фосфором, так и доминирование в фосфатном фонде нижележащих почвенных слоев фракции труднорастворимых высокоосновных фосфатов кальция типа апатита. Отмеченная тенденция к некоторому снижению величины данного показателя в почве под мискантусом по сравнению с паром связана с отчуждением наиболее мобильной части фосфатного фонда почвы при многолетнем выносе урожая.

Таким образом, результаты длительных исследований свидетельствовали, что культивирование плантаций мискантуса способствует решению ряда значимых экологических вопросов [29]: создает

культурный агроландшафт, рациональный в имеющихся почвенно-климатических условиях; обеспечивает получение устойчивого урожая качественной растениеводческой продукции, повышая эффективность использования низко плодородных земель; улучшает гумусное состояние и стабилизирует фонд подвижных форм зольных элементов почвы, тем самым препятствуя нарастающему истощению ее плодородия и деградации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В многолетних полевых опытах показана эффективная возможность выращивания мискантуса в зоне северной лесостепи и подтайги Западной Сибири. Региональные гидротермические условия позволяют ежегодно получать сухой массы мискантуса 10–15 т/га; плантации культуры можно беспрерывно возделывать в течение не менее 15 лет без снижения урожайности. Содержание в надземной биомассе мискантуса в фазе уборки 53% целлюлозы делает его перспективным сырьем для переработки; в начале вегетации зеленую массу можно использовать на кормовые цели. Подтверждена способность посадок мискантуса успешно произрастать на почвах с низким уровнем плодородия, оказывая на них положительное средообразующее воздействие. Установлено, что за 10 лет беспрерывного выращивания мискантуса на почве легкого гранулометрического состава содержание в ней гумуса возросло на 0.3–0.4%, несмотря на интенсивное использование растениями почвенного мобильного азота, генерируемого соответствующими минерализационными процессами.

Отмечена тенденция к накоплению подвижных форм зольных элементов в верхнем почвенном слое, связанная, возможно, как с биогенной аккумуляцией, так и с повышением степени мобильности их соединений. В целом исследования показали очевидную перспективность выращивания мискантуса в континентальных регионах России, в т.ч. на низкопродуктивных землях, препятствуя их прогрессирующей деградации, улучшая эколого-агрохимическое состояние агроценозов и обеспечивая агрономическую целесообразность производства.

Авторы благодарны сотрудникам ИЦиГ СО РАН Поцелуеву О.М. и Галицыну Г.Ю. за содействие в проведении полевых работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lewandowski I., Scurlock J.M.O., Lindvall E., Myrsini C. The development and current status of perennial rhizom-

atous grasses as energy crops in the US and Europe // *Biomass and Bioenergy*. 2003. V. 25 (4). P. 335–361.

2. Heaton E.A., Flavell R.B., Mascia P.N. et al. Herbaceous energy crop development: recent progress and future prospects // *Current Opinion in Biotechnology*. 2008. V. 19. P. 202–209.
3. Zub H.W., Brancourt-Hulmel M. Agronomic and physiological performances of different species of *Miscanthus*, a major energy crop. A review. *Agronomy for sustainable development*, Springer Verlag. EDP Sciences. INRA. 2010. № 30. 214 p.
4. Clark L.V., Brummer J.E., Głowacka K. et al. A footprint of past climate change on the diversity and population structure of *Miscanthus sinensis* // *Annals of Botany*. 2014. № 114. P. 97–107.
5. Jones M.B., Finnan J., Hodkinson T.R. Morphological and physiological traits for higher biomass production in perennial rhizomatous grasses grown on marginal land // *GCB Bioenergy*. 2015. № 7. P. 375–385.
6. Nijssen M., Smeets E., Stehfest E., Detlef P. van Vuuren. An evaluation of the global potential of bioenergy production on degraded lands // *GCB Bioenergy*. 2012. № 4. P. 130–147.
7. Figala J., Vranová V., Rejšek K., Formánek P. Giant miscanthus (*Miscanthus* × *Giganteus* Greef et Deu.) – A promising plant for soil remediation: A Mini Review // *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015. № 63. P. 2241–2246.
8. Сысо А.И., Смоленцев Б.А., Якименко В.Н. Почвенный покров новосибирского Академгородка и его эколого-агрономическая оценка // *Сибирский экологический журнал*. 2010. Т. 17. № 3. С. 363–377.
9. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
10. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
11. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. и др. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 430 с.
12. Капустянчик С.Ю., Данилова А.А., Лихенко И.Е. Продуктивность мискантуса сорта “Сорановский” первого года вегетации и дыхательная активность почвы // *Пермский аграрный вестник*. 2016. № 4. С. 82–87.
13. Smith L.L., Barney J.N. The relative risk of invasion: Evaluation of *Miscanthus giganteus* seed establishment // *Invasive Plant Science and Management*. 2014. № 7. P. 93–106.
14. Bonin C.L., Mutegi E., Chang H., Heaton E.A. Improved feedstock option or invasive risk? Comparing establishment and productivity of fertile *Miscanthus giganteus* to *Miscanthus sinensis* // *Bioenergy Research* 2017. V. 10 (2). P. 317–328.
15. Lewandowski I., Clifton-Brown J.C., Andersson B. et al. Environment and harvest time affects the combustion qualities of *Miscanthus* genotypes // *Agronomy Journal*. 2003. V. 95. P. 1274–1280.
16. Будаева В.В., Севастьянова Ю.В., Гисматулина Ю.А. и др. Особенности бумагообразующих свойств целлюлозы мискантуса // *Ползуновский вестник*. 2015. № 1. С. 78–82.

17. *Капустянчик С.Ю., Поцелуев О.М., Ломова Т.Г., Бакшаев Д.Ю.* Продуктивность и питательная ценность мискантуса сорта “Сорановский” / Почвы России: вчера, сегодня, завтра: сборник статей. Киров: Изд-во ВятГУ, 2017. С. 84–90.
18. *Зинченко В.А., Яшин М.* Энергия мискантуса // Лес-проминформ. 2011. № 6. С. 134–140.
19. *Кочергин А.Е., Гамзиков Г.П.* Эффективность азотных удобрений в черноземной зоне Западной Сибири // Агрохимия. 1972. № 6. С. 3–11.
20. *Himken M., Lammel J., Neukirchen D. et al.* Cultivation of Miscanthus under West European conditions: seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization // Plant and Soil. 1997. V. 189. P. 117–126.
21. *Lewandowski I., Kicherer A.* Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of Miscanthus giganteus // European Journal of Agronomy. 1997. № 6. P. 163–177.
22. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
23. *Якименко В.Н.* Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2019. № 10. С. 16–24.
24. *Johnston A.E., Goulding K.W.T.* The use of plant and soil analysis to predict the potassium supplying capacity of soil // Proc. 22-nd IPI Coll. – Soligorsk, USSR, 1990. P. 177–204.
25. *Якименко В.Н.* Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта // Агрохимия. 2019. № 3. С. 19–29.
26. *Антипина Л.П., Малыгина Л.П., Попцов С.П.* Оценка фосфатного состояния и оптимальные параметры его в почвах Западной Сибири // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 1992. № 2. С. 12–15.
27. *Аверкина С.С., Синещиков В.Е., Ткаченко Г.И.* Оценка методов определения фосфатов в черноземах Новосибирской области // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2011. № 11–12. С. 5–10.
28. *Кочергин А.Е.* Эффективность удобрений на черноземах Западной Сибири // Агрохимическая характеристика почв СССР. Районы Западной Сибири. М.: Наука, 1968. С. 316–336.
29. *Минеев В.Г.* Экологические функции агрохимии в современном земледелии // Агрохимия. 2000. № 5. С. 5–13.

## Evaluation of the Ecological and Agrochemical State of Agrocenosis with Long-Term Growing of Miscanthus in Western Siberia

**S. Yu. Kapustyanchik<sup>a</sup>, N. V. Burmakina<sup>a</sup>, and V. N. Yakimenko<sup>b,#</sup>**

<sup>a</sup> *Institute of Cytology and Genetics, Siberian Division, Russian Academy of Science  
prosp. Lavrentyeva 10, Novosibirsk 630090, Russia*

<sup>b</sup> *Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Division, RAS  
prosp. Lavrentyeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru*

Long-term field studies have shown the possibility of permanent cultivation of miscanthus for at least 15 years on low-fertile soils in the hydrothermal conditions of the agricultural zone of Western Siberia. Keeping 53% of the pulp in the aboveground biomass of miscanthus in the harvesting phase makes it a promising raw material for processing; at the beginning of the growing season, the green mass can be used for feed purposes. It was found that long-term plantings of miscanthus with an average annual yield of 12 tons of dry matter/ha had a positive environmental impact on agrocenosis. An increase of 0.3–0.4% in the humus content in the soil under the 10-year plantation of miscanthus was detected; a tendency to accumulate mobile forms of ash elements in the upper soil layer was noted.

*Key words:* miscanthus, agrocenosis, yield, soil, agrochemical properties.