




МИСКАНТУС – ПЕРСПЕКТИВНАЯ СЫРЬЕВАЯ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ФИТОМЕЛИОРАТИВНАЯ КУЛЬТУРА (литературный обзор)

© 2020 С. Ю. Капустянчик ¹, В. Н. Якименко²

Адрес: ¹Сибирский НИИ растениеводства и селекции – филиал ИЦиГ СО РАН, ул. С-100, зд. 21, Новосибирская обл., р.п. Краснообск, 630501, Россия. E-mail: kapustyanchik@bionet.nsc.ru

²Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, просп. Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

В литературном обзоре представлены сведения об одной из перспективных энергетических культур – мискантусе (*Miscanthus* spp.). Приведены данные по систематике, морфологии и фенологии растения, его урожайности и качеству получаемого целлюлозосодержащего сырья. Показана возможность эффективного выращивания многолетних плантаций мискантуса в континентальных регионах России. Рассматриваются результаты исследований средообразующего и фитомелиоративного воздействия посадок мискантуса на агроландшафт. Анализируются работы по изучению возможностей получения из биомассы мискантуса промышленной продукции с высокой добавленной стоимостью.

Ключевые слова: энергетические культуры; мискантус; урожайность; качество продукции; фитомелиоративное влияние; промышленная переработка

Цитирование: Капустянчик С.Ю., Якименко В.Н. Мискантус – перспективная сырьевая, энергетическая и фитомелиоративная культура (литературный обзор) // Почвы и окружающая среда. 2020. Т. 3. № 3. с.126. DOI: 10.31251/pos.v3i3.126

Эффективное и устойчивое развитие мировой экономики предусматривает обязательный и всесторонний учет экологических аспектов. Перманентный рост мирового энергопотребления и ограниченность, в целом, ископаемых источников сырья и энергии, обуславливают необходимость замены имеющихся промышленных технологий на энерго-, природо- и ресурсосберегающие биотехнологии. Серьезной мировой экологической проблемой современности является загрязнение окружающей среды пластиковыми упаковочными материалами и изделиями из синтетических полимеров. Это вызывает острую потребность в разработке и усиленном производстве биоразлагаемых и биосовместимых упаковочных материалов, в том числе из возобновляемых источников сырья, что будет способствовать экологической стабилизации природной среды. В этой связи в ряде стран мира активно развивается особое направление биотехнологии, основанное на получении ценных веществ и продуктов с высокой добавленной стоимостью из растительного сырья – биомассы энергетических культур с интенсивными темпами фотосинтетической деятельности. Биоэнергетические культуры можно разделить на три основные категории: 1) культуры, имеющие повышенное содержание крахмала и сахаров, используемые в производстве топливного этанола; 2) масличные культуры, применяемые в производстве биодизельного топлива; 3) лигноцеллюлозные культуры, идущие на производство высококачественной целлюлозы и технологичной продукции ее переработки, энергии, биогаза и этанола. Растущий интерес к использованию многолетних трав в качестве биоэнергетических и сырьевых культур отмечается во многих странах мира (Lewandowski et al., 2003; Heaton et al., 2008; Zub, Brancourt-Hulmel, 2010; Wilson et al., 2013; Lewandowski et al., 2016).

Одним из наиболее перспективных, в этом отношении, растений является мискантус (*Miscanthus* spp.), обладающий достаточно высоким адаптивным потенциалом. Его надземная целлюлозосодержащая биомасса относится к нетрадиционным возобновляемым источникам сырья и энергии, получение которых не требует значительных капитальных вложений. Проведенные в ряде стран исследования показали, что важной особенностью мискантуса является способность его производственных плантаций произрастать на одном месте более 20 лет без существенного снижения продуктивности, высокая интенсивность которой обусловлена специфической организацией фотосинтетической деятельности растения по C4-типу. Особого внимания заслуживает способность этой культуры длительное время произрастать на низкопродуктивных землях, что обеспечивает более высокую экономическую отдачу использования таких угодий (Nijssen et al., 2012; Clark et al., 2014; Jones et al., 2015; Figala et al., 2015; Lewandowski et al., 2016).

В ряде зарубежных стран мискантус активно используется при производстве целлюлозы, бумаги, этанола, упаковочных материалов и других ценных продуктов (Lewandowski et al., 2003; Heaton et al., 2008; Zub, Brancourt-Hulmel, 2010; Wilson et al., 2013; Lewandowski et al., 2016). Кроме того, в проведенных исследованиях показана перспективность применения мискантуса в качестве биоразлагаемого сорбента для борьбы с загрязнением территорий, в частности тяжелыми металлами, ликвидации разливов нефти и т.д. (Nijsen et al., 2012; Figala et al., 2015; Wang et al., 2020). В работах отечественных авторов (Зинченко, Яшин, 2011; Слынько и др., 2013; Булаткин, 2018; Гущина, Остробородова, 2019; Багмет, Дзюбенко, 2019; Сакович и др., 2020; Капустянчик и др., 2020) также подтверждается перспективность использования мискантуса, прогнозируются области культивирования на территории Российской Федерации, обосновывается настоятельная необходимость совершенствования технологий эффективной переработки этого целлюлозосодержащего растительного сырья, получаемого в специфических региональных условиях, описывается формирование и поддержание генофонда мискантуса в местных условиях (Дорогина и др., 2019).

Род Мискантус (*Miscanthus*) принадлежит к подсемейству Просовые (*Panicoideae*) семейства Злаки (*Poaceae*) порядка Злакоцветные (*Poales*). Все представители рода являются многолетними корневищными травами. Разнообразие видов мискантуса довольно велико – насчитывается более 10 видов, растущих в различных условиях – на сухих, влажных, засоленных почвах; на лугах, горных склонах, берегах рек и нарушенных территориях. В качестве биоэнергетического сырья первостепенный интерес представляют три вида: *M. sacchariflorus*, *M. sinensis* и *M. giganteus*. Ботанические характеристики этих видов имеют некоторые различия. *M. sacchariflorus* относится к длиннокорневищным травам высотой до 2–2,5 м, имеет прямой, жесткий стебель. Листья, длиной до 60 см, характеризуются узкой ланцетно-линейной формой. Абаксиальная поверхность листовой пластины голая, неопушенная, а адаксиальная – опушенная и имеет беловатую заметную середину с цельной формой края. Соцветие, длиной до 25 см, имеет вид веерообразной метелки бледно-фиолетового цвета в начале и бело-серого цвета в конце цветения (рисунок). *M. sinensis* представляет собой кустообразное растение высотой до 1,5 м, имеет компактную и менее разветвленную корневую систему. Листовые пластины похожи на пластины *M. sacchariflorus*, но абаксиальная поверхность опушена. Соцветие имеет окраску от золотистой до темно-фиолетовой. *M. giganteus* является стерильным гибридом, полученным в результате природного скрещивания *M. sacchariflorus* и *M. sinensis*.

Морфологическое строение подземной части растений мискантуса характеризуется мочковатой корневой системой с множеством придаточных корней, узлом кушения и видоизмененным побегом – корневищем. Узел кушения и подземные побеги располагаются на глубине 5–20 см от поверхности почвы. Корни размещаются в слое почвы от нескольких сантиметров до 1,5 м. Корневища обладают округлой или сплюснутой формой. На их поверхности наблюдаются редуцированные листья в виде бесцветных или бурых чешуй, в пазухах которых развиваются боковые почки. При высадке растений отрезками корневищ наблюдается формирование узла кушения, от которого происходит развитие новых подземных побегов с отходящими придаточными корнями. Мискантус использует корневища и корни в качестве хранилища элементов питания и углеводов, что позволяет ему эффективно использовать питательные вещества во время вегетационного периода (Зинченко, Яшин, 2011; Гущина, Остробородова, 2019; Капустянчик и др., 2020).

Растения мискантуса в континентальных условиях в течение вегетационного периода проходят ряд фаз с характерными морфологическими и физиологическими признаками – всходы и развитие листьев, рост междоузлий (удлинение стебля), кушение, выход в трубку, появление соцветий, цветение, старение (рисунок). *M. sacchariflorus*, *M. sinensis* не считаются стерильными видами, но в условиях Западной Сибири данные виды не производят семян, поэтому стадии развития семян и созревания отсутствуют.

Естественное географическое распространение рода *Miscanthus* приурочено к умеренной и субтропической зонам Юго-Восточной Азии, простираясь на запад до Центральной Индии и на восток до Полинезии; несколько видов обнаружены в Африке, а также на Дальнем Востоке в бореальной зоне (Yanetal, 2012). Растения мискантуса в целом хорошо приспосабливаются к различным местам обитания, способны произрастать на разных высотах, что говорит о значительном адаптивном потенциале рода. Однако триплоид *M. giganteus* является наиболее распространенной формой для выращивания в более южных регионах (Hodkinson et al., 2002). Мискантус имеет фотосинтез C4-типа с высоким уровнем эффективности использования воды,

света и элементов питания, при этом, в отличие от других видов растений С4-типа, некоторые виды мискантуса способны произрастать в относительно холодном климате (Bonin et al., 2014). Повышенная холодоустойчивость отдельных видов мискантуса делает его перспективным кандидатом для возделывания в континентальных регионах России, в том числе в Сибири.

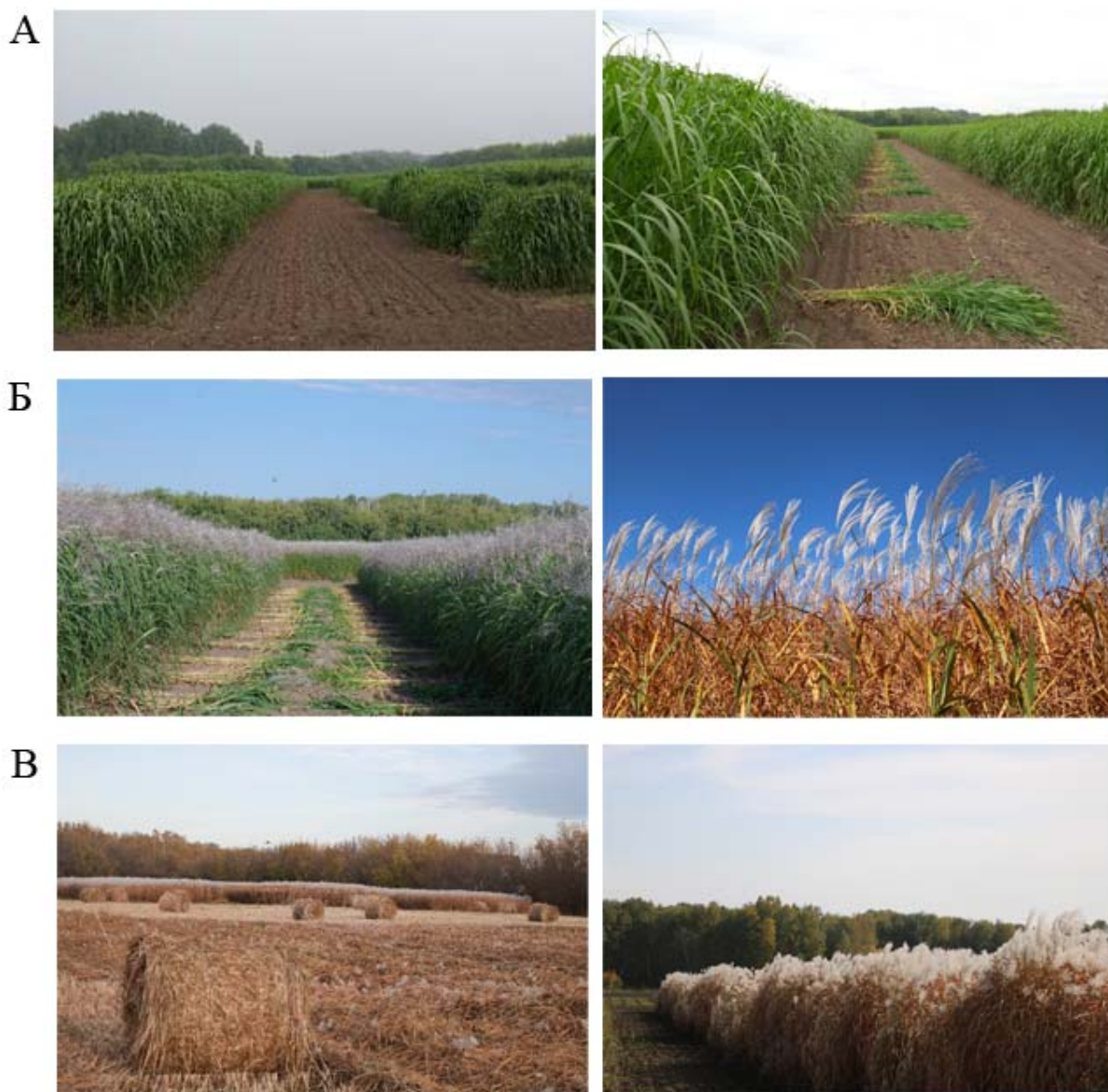


Рисунок. Плантации мискантуса (*M. sacchariflorus*) сорта Сорановский при прохождении различных фенофаз в течение вегетационного периода и технологическая операция (уборка) в конце вегетации (Новосибирская обл., Россия).

А – кушение и выход в трубку; Б – цветение и старение; В – уборка надземной биомассы.

Сведения об интродукции мискантуса довольно противоречивы. По одним данным, различные виды мискантуса первоначально были завезены в Европу из Азии в декоративных целях в 1930-х годах, по другим – *M. sacchariflorus* был завезен в Европу в конце 1800-х годов русским ботаником К.И. Максимовичем. Сообщается, что *M. sinensis* присутствовал в США еще до 1900 года и был посажен в усадьбах Балтимора. Есть сведения, что оригинальный гибрид *M. giganteus* возник на юге Японии и затем был привезен в Данию в 1935 году (Hodkinson et al., 2002; Heaton et al., 2008).

Одни из первых упоминаний о роде *Miscanthus* на территории бывшего Советского Союза (Европейская часть) связаны с исследованиями по оценке растений с точки зрения пригодности для использования в кормопроизводстве (Кормовые растения..., 1950); отмечалась перспективность применения биомассы культуры для приготовления силоса и в качестве подножного корма на ранних

стадиях развития. Мискантус также выращивали на берегах засыхающих озёр для очистки воды и спасения озерной флоры и фауны и для борьбы с эрозией почв.

Недавно проведенные исследования кормовых качеств мискантуса (Капустянчик и др., 2017; Капустянчик и др., 2020) показали их снижение в течение вегетационного периода; по мере прохождения фенофаз в надземной биомассе уменьшается количество протеина и жира и увеличивается содержание клетчатки (табл. 1). Содержание в биомассе обменной энергии (ОЭ) 9–10 МДж/кг в начале вегетации также свидетельствует о возможности получения в этот период корма довольно хорошего качества.

Таблица 1

Качество корма и питательность зелёной массы мискантуса 3-го года посадки по фазам вегетации (средние данные)

Фаза вегетации	Влажность, %	Химический состав, % в сух. вещ.				Питательность 1 кг корма	
		протеин	жир	клетчатка	зола	к. е.	ОЭ, МДж/кг
Начало развития листьев (конец мая)	77,4	19,8	2,0	27,1	11,4	0,86	10,17
Рост междоузлий (июнь–июль)	63,9	12,1	2,2	28,9	6,5	0,78	9,27
Выход в трубку (июль–август)	46,3	6,9	1,0	41,5	5,5	0,61	8,51

На территорию Западной Сибири мискантус был завезен в 90-х годах прошлого века с Дальнего Востока сотрудниками Института цитологии и генетики СО РАН. Методами фенотипирования и анализа ДНК новая техническая культура была отнесена к виду *Miscanthus sacchariflorus* (Слынько и др., 2013). В результате популяционно-генетических и селекционных работ был выведен сорт Сорановский, внесенный в Государственный реестр селекционных достижений (свидетельство № 58540).

В исследованиях, проведенных в различных почвенно-климатических условиях, установлено, что важной особенностью мискантуса является его положительная средообразующая и фитомелиоративная способность, возможность эффективно произрастать на деградированных почвах, заметно улучшая их свойства. В работах ряда авторов показана перспективность выращивания многолетних посадок мискантуса на землях, подверженных эрозии (Venuto, Daniel, 2010) и наводнениям (Barney et al., 2009); на отвалах, образуемых после добычи полезных ископаемых (Marra et al., 2013; Chen et al., 2013); на кислых и засоленных почвах (Krizek et al., 2003; Schmer et al., 2012; Zhuo et al., 2015); почвах, загрязненных тяжелыми металлами (Pidlisnyuk et al., 2014); опесчаненных почвах (DiNasso et al., 2015). Продуктивность биомассы этой культуры на маргинальных землях сильно варьирует (в пределах 1–14 т/га) и зависит от состояния используемых почв, применения удобрений и вида растений (Blanco-Canqui, 2016).

Потенциальная продуктивность мискантуса при благоприятных факторах внешней среды может достигать 40 т сухой массы с 1 га, реальная же зависит от величины прихода фотосинтетической активной радиации (ФАР) и эффективности ее использования, почвенно-гидротермических условий выращивания, продолжительности вегетационного периода и вида растения. По усредненным данным (Lewandowski et al., 2003), урожайность трёхлетних посадок мискантуса в условиях Англии составляла: у *Miscanthus giganteus* – 13,8–18,7 т/га, *M. sacchariflorus* – 11–12, *M. sinensis* – 4,6–10,9 т/га; в Германии, соответственно, 22,8–29,1; 12–13 и 9,1–12,8 т/га, а в Португалии – 34,7–37,8; 35–36 и 16,1–22,4 т/га. Влияние климатических условий региона на урожайность мискантуса также показано в работах ряда отечественных и зарубежных авторов (табл. 2).

Таблица 2

Урожайность мискантуса в различных регионах мира

Регион	Климат		Вид	Урожай, т/га	Источник
	Средняя t° за год, $^{\circ}C$	Осадки, мм в год			
США, New Jersey	11,2	1211	<i>M. giganteus</i>	9,5	Masters et al., 2016; Kalinina et al., 2017
США, Illinois	11,1	1043	<i>M. giganteus</i>	15,6	
США, Nebraska	9,7	704	<i>M. giganteus</i>	27,7	
Испания	13,9	100,3	<i>M. giganteus</i>	17,6	Tubeilen et al., 2016
Франция	11,5	557	<i>M. giganteus</i>	16,9	Dufoss, 2014
Франция	17,8	390	<i>M. giganteus</i>	22	Maughan, 2012
Россия (Европейская часть)	4,5	620	<i>M. sinensis</i>	7,8	Nunn et al., 2017
			<i>M. giganteus</i>	5,7	
			<i>M. sacchariflorus</i>	4,2	
Россия (Западная Сибирь)	1,7	464	<i>M. giganteus</i>	16,6	Данные авторов
			<i>M. sacchariflorus</i>	12	

В длительных опытах, проводимых в лесостепи Западной Сибири (Капустянчик и др., 2020), продуктивность разновозрастных посадок *M. sacchariflorus* варьировала в пределах 10–16 т/га, при среднем значении около 12 т/га. Отмечена холодоустойчивость культуры, ее вегетативное размножение, способность после высадки корневищ уже на 2–3-й год создавать ровную плантацию высотой до 2,5 (см. рис.). В отличие от *M. sacchariflorus*, *M. giganteus* имел большую продуктивность биомассы (16,6 т/га), но ее качество было ниже из-за неполного прохождения фенофаз в вегетационный период: на момент уборки еще не завершалась стадия появления соцветий, убираемая биомасса характеризовалась повышенной влажностью.

Определенную дискуссионность может вызывать вопрос об инвазивности *M. sacchariflorus*. Обильные корневища культуры, активно распространяющиеся в 20-см почвенном слое, некоторые исследователи склонны относить к инвазивному риску (Bonin et al., 2014). Однако известно, что инвазивность свойственна, прежде всего, растениям, размножающимся семенами. В этой связи, по мнению ряда авторов, мискантус не представляет инвазивной угрозы для сельскохозяйственных угодий (Smith, Barney, 2014; Bonin et al., 2017). В континентальных регионах с относительно холодным климатом *M. sacchariflorus* обычно не дает семян, тем самым минимизируя риск инвазивного распространения (Капустянчик и др., 2020).

Одной из особенностей энергетических многолетних трав, в том числе мискантуса, является глубокое и обильное проникновение корней в почвенную толщу, что увеличивает пористость почвы, улучшает ее агрегатный состав и водопроходимость агрегатов. Повышенная пористость способствует интенсификации просачивания влаги и, таким образом, уменьшает сток на склоновых землях. Оптимизация агрофизических свойств почвы под воздействием энергетических культур положительно коррелирует с увеличением общей концентрации почвенного органического углерода. Исследования секвестрирования углерода многолетними энергетическими культурами показали их способность связывать углерод (от 0,25 до 4 т/га в год почвенного C) и улучшать при этом агрофизические свойства почвы, увеличивать микробную биомассу и ее активность (Blanco-Canqui et al., 2014).

В проведенных исследованиях установлено, что многолетние энергетические травы требуют относительно низкого почвенного уровня питательных веществ по сравнению с однолетними культурами, обладают высокой продуктивностью на низкоплодородных землях и способностью длительного бессменного произрастания на плантациях. В Европе, Азии и Америке среди всего разнообразия многолетних трав выделяется наиболее перспективный представитель данной группы растений – род *Miscanthus* (Lewandowski et al., 2003; Heaton et al., 2008; Zub, Brancourt-Hulmel, 2010). В условиях Западной Сибири учеными ИЦиГ СО РАН проводится изучение различных дикорастущих и культурных энергетических растений, в том числе из семейства злаковых. Например, канареечник тростниковидный (*Phalaroides arundinaceae* Raush.) имеет урожай зеленой массы 30–35 т/га, содержание целлюлозы 44,2 % (абс.-сух. сырья), высоту побегов 220 см; овсяница тростниковидная (*Festuka arundinaceae* Schreb.) – урожай зеленой массы 39–45 т/га, содержание целлюлозы 40 % (абс.-сух. сырья), высоту побегов 158 см; ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) – урожай зеленой массы 33–38 т/га, содержание целлюлозы 55,4 % (абс.-сух. сырья), высоту побегов 150 см. Однако по комплексу биологических, хозяйственных и биохимических показателей мискантус является наиболее предпочтительным (Капустянчик и др., 2020).

Одним из достоинств мискантуса является обеспечение его посадками положительного энергетического баланса и профицитного баланса гумуса. По данным В.А. Зинченко и М. Яшина (2011), урожай надземной биомассы этой культуры в 20 т/га может обеспечить столько же энергии, сколько производится из 12 т угля. При выращивании мискантуса уже на 5-й год в почве плантаций наблюдается увеличение (на 0,1–0,2 %) содержания гумуса (Зинченко, Яшин, 2011). Показано, что при выращивании мискантуса в течение 10 лет на почвах легкого гранулометрического состава содержание гумуса в почве возросло на 0,3–0,4 %, несмотря на интенсивное использование растениями почвенного мобильного азота, генерируемого соответствующими минерализационными процессами (Капустянчик и др., 2020).

Исследования, проведенные за рубежом в посадках мискантуса, свидетельствуют, что запасы углерода в почве под этой культурой увеличиваются на 2 т/га в год (Robertson et al., 2017). В период формирования многолетних посадок мискантуса (4 года) в условиях Западной Сибири была проведена оценка компонентов баланса углерода, которая показала наличие объективных предпосылок для закрепления углерода атмосферы в устойчивых фракциях почвенного органического вещества (Капустянчик и др., 2021). В работе С.Ю. Капустянчик с соавторами (2020) установлено достоверное накопление углерода в верхнем слое почвы под многолетними посадками мискантуса и, кроме того, тенденция увеличения содержания зольных элементов, связанного, вероятно, как с их биогенной аккумуляцией, так и с повышением степени подвижности почвенных форм элементов.

С.Ю. Капустянчик с соавторами (2020) определили, что ежегодный вынос мискантусом элементов питания из почвенных запасов при средней урожайности 12 т/га составляет: азота – 17–20 кг/га, фосфора – 11–17, калия – 35–40, магния – 2–3 кг/га. По сравнению с другими урожайными культурами, такие масштабы отчуждения питательных элементов из почвы представляются невысокими. Низкую потребность мискантуса в почвенных запасах элементов питания отмечали и другие авторы (Lewandowski et al., 2003; Nijssen et al., 2012; Jones et al., 2015).

По данным некоторых исследователей (Himken et al., 1997; Lewandowski, Kicherer, 1997) применение удобрений под мискантус целесообразно только в первые 1–2 года формирования плантации на почвах с очень низким содержанием NPK. Слабая отзывчивость этой культуры на внесение удобрений во многом связана с ее 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. Весной эти резервы мобилизуются для роста новых побегов, делая мискантус в определенной степени независимым от уровня почвенного плодородия.

В целом можно сказать, что исследования, проведенные в различных странах мира в разных почвенно-климатических условиях, установили положительные средообразующие возможности мискантуса, его очевидный фитомелиоративный и адаптивный потенциал. Выявлена способность растений рода *Miscanthus* поддерживать высокий уровень фотосинтеза C4-типа при низких температурах (Lewandowski et al., 2000; Naidu et al., 2003; Heaton et al., 2008), показаны невысокие потребности в питательных веществах, способность связывать большое количество углерода, хорошая эффективность использования имеющейся влаги, высокая продукция биомассы (Clifton-Brown, Lewandowski, 2000; Lewandowski et al., 2003; Foereid et al., 2004), а также повышенная устойчивость к болезням и вредителям (Зинченко, Яшин, 2011).

Таким образом, результаты длительных исследований (Капустянчик и др., 2020; и др.) свидетельствуют, что культивирование плантаций мискантуса способствует решению ряда значимых экологических вопросов: создает культурный агроландшафт, рациональный в определенных почвенно-климатических условиях; обеспечивает получение устойчивого урожая качественной растениеводческой продукции, что повышает 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.

Химический анализ надземной биомассы мискантуса (табл. 3) (Будаева и др. 2015) подтверждает его ценность как источника энергии и сырья для переработки в продукцию с высокой добавленной стоимостью (Слынько и др., 2013; Гисматулина и др., 2015; Сакович и др., 2020). Высокое содержание целлюлозы (до 51 %) при относительно низком уровне лигнина (до 20 %) и жировосковой фракции (0,9 %) характеризует мискантус как перспективную урожайную сырьевую культуру со значительным экономическим потенциалом возделывания и переработки. Показано, что отличия в содержании органических соединений в биомассе в зависимости от вида культуры невелики (табл. 3).

Таблица 3

Содержание соединений в надземной биомассе мискантуса, % от абс.-сух. вещества

Вид	Целлюлоза	Лигнин	Пентозаны	Зольность	Жировосковая фракция
<i>Miscanthus sacchariflorus</i>	50,65±1,0	16,98±0,5	24,90±0,5	2,37±0,1	0,70±0,5
<i>M. sinensis</i>	50,92±1,0	20,70±0,5	24,72±0,5	2,19±0,1	0,85±0,5
<i>M. giganteus</i>	46,72±1,0	18,50±0,5	17,85±0,5	3,12±0,1	1,12±0,5

Одним из перспективных направлений использования мискантуса на сегодняшний день является целлюлозно-бумажная промышленность. Эффективная возможность получения отдельных сортов бумаги из биомассы мискантуса показана в ряде работ (Hurter, 2014; Будаева и др. 2015; Гисматулина и др., 2015). В таблице 4 приведены характеристики бумаги, произведенной из *M. sacchariflorus* сорта Сорановский, выращенного в Западной Сибири (Гисматулина и др., 2015).

Таблица 4

Показатели качества бумаги, полученной из мискантуса сорта Сорановский

Показатель качества	Значение
Средняя толщина образца, мкм	96,5
Плотность, г/см ³	0,827
Разрывная длина, м	3200
Сопротивление продавливанию, кПа	68
Сопротивление раздиранию, мН	130
Жесткость при растяжении, кН/м	410
Работа разрушения, Дж/м ²	10,79
Разрушающее напряжение, Мпа	26,51
Разрушающая деформация, %	0,76

В проведенных российскими учеными исследованиях установлена возможность получения из биомассы мискантуса качественной целлюлозы, в том числе нанокристаллической, используемой для изготовления различной высокотехнологичной продукции (Слынько и др., 2013; Gismatulina et al., 2015; Budaeva et al., 2016; Сакович и др., 2020). Достоверно показано, что из мискантуса можно получить целлюлозу как для последующего синтеза простых и сложных эфиров, так и для выработки особых видов бумаги.

С применением отечественных ферментов, дрожжей, микробиологических консорциумов и штаммов из мискантуса получены глюкозные гидролизаты, биоэтанол (топливный и в качестве прекурсора для химических продуктов), бактериальная целлюлоза и молочная кислота. Мискантус может эффективно использоваться в производстве одноразовой биоразлагаемой посуды, биобетона, композитных материалов, биотоплива и др.

Производство биоэтанола, являющегося приоритетным биотопливом, получило широкое развитие в ряде зарубежных стран (Lewandowski et al., 2003; Heaton et al., 2008; Nunn et al., 2017). Оно основано на использовании быстровозобновляемого целлюлозосодержащего сырья, к которому, в том числе, относится и мискантус. Проведенные исследования (Baibakova, Skiba, 2015; Юрина, 2015) характеризуют получаемую из мискантуса продукцию как спирт высокого качества, предназначенный для непищевого использования; установлено, что в производимом из мискантуса биоэтаноле доля метанола очень мала, невысоко и содержание сивушных масел и эфиров.

Таким образом, анализ научных работ, выполненных в разных странах мира, свидетельствует о большой перспективности возделывания мискантуса как сырьевой и энергетической культуры с возможностями широкого использования в различных отраслях экономики, способной формировать продуктивные многолетние плантации на низкоплодородных почвах и в регионах с континентальным климатом, в том числе в Сибири.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках бюджетных проектов Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции – филиала ФИЦ Институт цитологии и генетики СО РАН № 0259-2021-0018 и Института почвоведения и агрохимии СО РАН № АААА-А17-117030110078-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багмет Л.В., Дзюбенко Е.А. Прогнозирование областей культивирования *Miscanthus sacchariflorus* (Роасеае) на территории Российской Федерации // *Vavilova*. 2019. Т.2 №4. С. 35–49. DOI: [10.30901/2658-3860-2019-4-35-49](https://doi.org/10.30901/2658-3860-2019-4-35-49)
2. Будаева В.В., Севастьянова Ю.И., Гисматулина Ю.А. и др. Особенности бумагообразующих свойств целлюлозы мискантуса // *Ползуновский вестник*. 2015. Т.1. № 4. С. 78–82.
3. Булаткин Г.А. Исследование эффективности энергетических культур на примере мискантуса китайского (*Miscanthus sinensis* Anderss.) // *Экологический вестник России*. 2018, № 10. С. 36–41.
4. Гисматулина Ю.А., Севастьянова Ю.В., Будаева В.В., Золотухин В.Н. Структурно-размерные характеристики целлюлозы из мискантуса // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2. С. 3523–3526.
5. Гущина В.А., Остробородова Н.И. Формирование биомассы мискантуса гигантского в лесостепи Среднего Поволжья // *Нива Поволжья*. 2019. № 3 (52). С. 81–87.
6. Дорогина О.В., Васильева О.Ю., Нурдина Н.С. и др. Формирование и изучение коллекционного генофонда ресурсных видов рода *Miscanthus* Anderss. в условиях лесостепи Западной Сибири // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019. Т. 23. №7. С. 926–932. DOI : [10.18699/VJ19.568](https://doi.org/10.18699/VJ19.568)
7. Зинченко В.А., Яшин М. Энергия мискантуса // *Леспромформ*. 2011. № 6 (80). С. 134–140.
8. 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. Сборник статей по материалам Всероссийской с международным участием научной конференции, посвящённой Году экологии и 90-летию со дня рождения профессора В. В. Тюлина. Отв. за вып. А. М. Прокашев. 2017Киров: Изд-во ВятГУ, 2017. С. 84–90.
9. Капустянчик С.Ю., Бурмакина Н.В., Якименко В.Н. Оценка эколого-агрохимического состояния агроценоза с многолетним выращиванием мискантуса в Западной Сибири // *Агрохимия*. 2020. № 9. С. 65–73. DOI: [10.31857/S0002188120090082](https://doi.org/10.31857/S0002188120090082)
10. Капустянчик С.Ю., Данилова А.А., Лихенко И.Е. *Miscanthus sacchariflorus* в Сибири. Параметры продукционного процесса, динамика биофильных элементов // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. № 1. С. 25–33. (в печати)
11. Кормовые растения сенокосов и пастбищ СССР // Под ред. И.В. Ларина. Т. 1. Спорные, голоосеменные и однодольные. Ленинград, 1950. 315 с.
12. Сакович Г.В., Скиба Е.А., Гладышева Е.К., Голубев Д.С., Будаева В.В. Мискантус – сырье для производства бактериальной наноцеллюлозы // *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2020. Т. 495. С. 35–38. DOI: [10.31857/S2686953520060138](https://doi.org/10.31857/S2686953520060138)
13. Слынько Н.М., Горячковская Т.Н., Шеховцов С.В. и др. Биотехнологический потенциал новой технической культуры – Мискантус сорт Сорановский // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2013. Т.17. №4/1. С. 765–771.

14. Юрина Г.Ф. Обзор инноваций в технологии биоэтанола // *Биотехнология и общество в XXI веке: Сборник статей Международной научно-практической конференции (Барнаул, 2015, 15-18 сентября)* / Под ред.: А.А. Ильичев. Барнаул: АлтГУ. 2015. С. 304–307
15. Baibakova O.V., Skiba E.A. Biotechnological aspects of ethanol biosynthesis from *Miscanthus* // *Russ J Genet Appl Res.* 2015. V. 5, No. 1. P. 69–74. DOI: [10.1134/S2079059715010025](https://doi.org/10.1134/S2079059715010025)
16. Barney J.N., Mann J.J., Kyser G.B. et al. Tolerance of switchgrass to extreme soil moisture stress: ecological implications // *Plant Sci.* 2009. V. 177. Is. 6. P. 724–732. DOI: [10.1016/j.plantsci.2009.09.003](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.09.003)
17. Blanco-Canqui H., Gilley J., Eisenhauer D., Boldt A. Soil carbon accumulation under switchgrass barriers // *Agron. J.* 2014. V. 106. Is. 6. P. 2185–2192. DOI: [10.2134/agronj14.0227](https://doi.org/10.2134/agronj14.0227)
18. Bonin C. L., Heaton E. A., Barb J. *Miscanthus sacchariflorus* – biofuel parent or new weed? // *Global Change Biology Bioenergy.* 2014. Vol. 6. Is.6. P. 629–636. DOI: [10.1111/gcbb.12098](https://doi.org/10.1111/gcbb.12098)
19. 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. P. 317–328. DOI: [10.1007/s12155-016-9808-1](https://doi.org/10.1007/s12155-016-9808-1)
20. Budaeva V.V., Makarova E.I., Gismatulina Yu.A. Integrated flowsheet for conversion of non-woody biomass into polyfunctional materials // *Key Engineering Materials.* 2016. V. 670. P. 202–206. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.670](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.670)
21. Chen L.M., Stehouwer R., Wu M.L. et al. Minesoil response to reclamation by using a flue gas desulfurization product // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 2013. V. 77. Is.5. P. 1744–1754. DOI: [10.2136/sssaj2013.02.0054](https://doi.org/10.2136/sssaj2013.02.0054)
22. Clark L.V., Brummer J.E., Glowacka K. et al. A footprint of past climate change on the diversity and population structure of *Miscanthus sinensis* // *Annals of Botany.* 2014. V. 114. Is.1. P. 97–107. DOI: [10.1093/aob/mcu084](https://doi.org/10.1093/aob/mcu084)
23. Clifton-Brown J.C., Lewandowski I. Water use efficiency and biomass partitioning of three different *Miscanthus* genotypes with limited and unlimited water supply // *Annals of Botany.* 2000. V. 86. Is.1. P. 191–200. DOI: [10.1006/anbo.2000.1183](https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1183)
24. Di Nasso N.N.O., Lasorella M.V., Roncucci N., Bonari E. Soil texture and crop management affect switchgrass (*Panicum virgatum* L.) productivity in the Mediterranean // *Ind. Crops Prod.* 2015. V. 65. P. 21–26. DOI: [10.1016/j.indcrop.2014.11.017](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.017)
25. Dufoss K., Drewerc J., Gabrielle B., Droueta J.-L. Effects of a 20-year old *Miscanthus × giganteus* stand and its removal on soil characteristics and greenhouse gas emissions // *Biomass and bioenergy.* 2014. V.69. P. 198–210. DOI: [10.1016/j.biombioe.2014.07.003](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.07.003)
26. 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. V. 63. Is.6. P. 2241–2246. DOI: [10.11118/actaun201563062241](https://doi.org/10.11118/actaun201563062241)
27. Foereid B., Neergaard A., Henning H.J. Turnover of organic matter in a *Miscanthus* field: Effect of time in *Miscanthus* cultivation and inorganic nitrogen supply // *Soil Biology and Biochemistry.* 2004. V. 36. Is. 7. P. 1075–1085. DOI: [10.1016/j.soilbio.2004.03.002](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.03.002)
28. Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Veprev S.G., Sakovich G.V., Shumny V.K. Cellulose from various parts of *Soranovskii Miscanthus* // *Russ J Genet Appl Res.* 2015. V. 5, No. 1. P. 60–68. DOI: [10.1134/S2079059715010049](https://doi.org/10.1134/S2079059715010049)
29. Blanco-Canqui H. Growing dedicated energy crops on marginal lands and ecosystem services // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 2016. V. 80. Is.4. P. 845–858. DOI: [10.2136/sssaj2016.03.0080](https://doi.org/10.2136/sssaj2016.03.0080)
30. 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. Is.3. P. 202–209. DOI: [10.1016/j.copbio.2008.05.001](https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.05.001)
31. 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. DOI: [10.1023/A:1004244614537](https://doi.org/10.1023/A:1004244614537)
32. Hodkinson, T.R., Chase M.W., Takahashi C. et al. The use of dna sequencing (ITS and trnL-F), AFLP, and fluorescent in situ hybridization to study allopolyploid *Miscanthus* (Poaceae) // *American J. of Botany.* 2002. V. 89, № 2. P. 279–286. DOI: [10.3732/ajb.89.2.279](https://doi.org/10.3732/ajb.89.2.279)
33. Hurter B. Nonwood fibers offer potential opportunity for papermakers // *TAPPI J.* 2014. V. 13. № 6. P. 5–6.
34. Jones M.B., Finnan J., Hodkinson T.R. Morphological and physiological traits for higher biomass production in perennial rhizomatous grasses grown on marginal land // *Global Change Biology Bioenergy.* 2015. Vol.7. Is.2 P. 375–385. DOI: [10.1111/gcbb.12203](https://doi.org/10.1111/gcbb.12203)
35. Kalinina O., Nunn C., Sanderson R. et al. Extending *Miscanthus* cultivation with novel germplasm at six contrasting sites // *Front. Plant Sci.* 2017. V.8. P.563. DOI: [10.3389/fpls.2017.00563](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00563)
36. Krizek D.T., Ritchie J.C., Sadeghi A.M. et al. A four-year study of biomass production of eastern gamagrass grown on an acid compact soil // *Soil Sci. Plant Anal.* 2003. V. 34. P. 457–480. DOI: [10.1081/CSS-120017832](https://doi.org/10.1081/CSS-120017832)
37. Lewandowski I., Kicherer A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus* // *Eur. J. of Agron.* 1997. V.6. Is.3-4. P. 163–177. DOI: [10.1016/S1161-0301\(96\)02044-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(96)02044-8)

38. Lewandowski I., Clifton-Brown J.C., Scurlock J.M.O. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop // *Biomass and Bioenergy*. 2000. V.19. Is.4. P. 209–227. DOI: [10.1016/S0961-9534\(00\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00032-5)
39. Lewandowski I., Clifton-Brown J.C., Andersson B. et al. Environment and harvest time affects the combustion qualities of *Miscanthus* genotypes // *Agr. J.* 2003. V.95. Is.5. P.1274–1280. DOI: [10.2134/agronj2003.1274](https://doi.org/10.2134/agronj2003.1274)
40. Lewandowski I., Scurlock J.M.O., Lindvall E., Myrsini C. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe // *Biomass and Bioenergy*. 2003. V.25. Is.4. P. 335–361. DOI: [10.1016/S0961-9534\(03\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00030-8)
41. Lewandowski I., Clifton-Brown, J., Trindade, L. M. et al. Progress on optimizing *Miscanthus* biomass production for the European bioeconomy: results of the EU FP7 project OPTIMISC // *Front. Plant Sci.* 2016. V.7. P. 1–23. DOI: [10.3389/fpls.2016.01620](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01620)
42. Marra M., Keene T., Skousen J., Griggs T. Switchgrass yield on reclaimed surface mines for bioenergy production // *J. Environ.* 2013. V.42. Is.3. P. 696–703. DOI: [10.2134/jeq2012.0453](https://doi.org/10.2134/jeq2012.0453)
43. Masters M.D., Black C.K., Kantola I.B. et al. Soil nutrient removal by four potential bioenergy crops: *Zea mays*, *Panicum virgatum*, *Miscanthus* × *giganteus* and prairie // *Agric Ecosyst Environ.* 2016. V. 216. P. 51–60. DOI: [10.1016/j.agee.2015.09.016](https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.016)
44. Maughan M. *Miscanthus* × *giganteus* productivity: the effects of management in different environments // *Global Change Biology Bioenergy*. 2012. V.4. Is.3. P. 253–265. DOI: [10.1111/j.1757-1707.2011.01144.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01144.x)
45. Naidu S.L., Moose S.P., Al-Shoaibi A.K. et al. Gold tolerance in *Miscanthus* × *giganteus*: adaptation in amounts and sequence of C4 photosynthetic enzymes // *Plant Physiology*. 2003. V. 132. P. 1688–1697.
46. Nijsen M., Smeets E., Stehfest E. et al. An evaluation of the global potential of bioenergy production on degraded lands // *Global Change Biology Bioenergy*. 2012. No4. Is. 2. P. 130–147. DOI: [10.1111/j.1757-1707.2011.01121.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01121.x)
47. Nunn C., Hastings A., Kalinina O. et al. Environmental influences on the growing season duration and ripening of diverse *Miscanthus* germplasm grown in six countries // *Front. Plant Sci.* 2017. No8. P.1–14. DOI: [10.3389/fpls.2017.00907](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00907)
48. Pidlisnyuk V., Erickson L., Kharchenko S., Stefanovska T. Sustainable land management: growing miscanthus in soils contaminated with heavy metals // *J. Environ. Prot.* 2014. V.5. No8. P. 723–730. DOI: [10.4236/jep.2014.58073](https://doi.org/10.4236/jep.2014.58073)
49. Robertson A.D., Davies Ch. A., Smith P. et al. Carbon inputs from *Miscanthus* displace older soil organic carbon without inducing priming // *Bioenerg. Res.* 2017. V. 10. P. 86–102. DOI: [10.1007/s12155-016-9772-9](https://doi.org/10.1007/s12155-016-9772-9)
50. Schmer M.R., Xue Q., Hendrickson J.R. Salinity effects on perennial, warm-season (C4) grass germination adapted to the northern Great Plains // *Can. J. Plant Sci.* 2012. V. 92. No5. P. 873–881. DOI: [10.4141/cjps2012-001](https://doi.org/10.4141/cjps2012-001)
51. Smith L.L., Barney J.N. The relative risk of invasion: Evaluation of *Miscanthus* × *giganteus* seed establishment // *Invasive Plant Science and Management*. 2014. V.7. No1. P. 93–106. DOI: [10.1614/IPSM-D-13-00051.1](https://doi.org/10.1614/IPSM-D-13-00051.1)
52. Tubeifen F., Rennie T.J., Goss M.J. A review on biomass production from C4 grasses: yield and quality for end-use // *Current Opinion in Plant Biology*. 2016. V. 31. P. 172–180. DOI: [10.1016/j.pbi.2016.05.001](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.05.001)
53. Venuto B.C., Daniel J.A. Biomass feedstock harvest from Conservation Reserve Program land in northwestern Oklahoma // *Crop Sci.* 2010. V. 50. Is.2. P. 737–743. DOI: [10.2135/cropsci2009.11.0641a](https://doi.org/10.2135/cropsci2009.11.0641a)
54. Wang C., Kong Y., Hu R., Zhou G. *Miscanthus*: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production // *Global Change Biology Bioenergy*. 2020. V. 13. Is.1. P.1–12. DOI: [10.1111/gcbb.12761](https://doi.org/10.1111/gcbb.12761)
55. Wilson D.M., Dalluge D.L., Rover M. et al. Crop management impacts biofuel quality: influence of switchgrass harvest time on yield, nitrogen and ash of fast pyrolysis products // *Bioenerg. Res.* 2013. V. 6. P. 103–113. DOI: [10.1007/s12155-012-9240-0](https://doi.org/10.1007/s12155-012-9240-0)
56. Yan J., Chen W., Luo F. et al. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication // *GGB Bioenergy*. 2012. V.4. Is.1. P. 49–60. DOI: [10.1111/j.1757-1707.2011.01108.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01108.x)
57. Zhuo Y., Zhang Y.F., Xie G.H., Xiong S.J. Effects of salt stress on biomass and ash composition of switchgrass (*Panicum virgatum*) // *Acta Agric. Scand. Sect.* 2015. V.65. P.300–309. DOI: [10.1080/09064710.2015.1006670](https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1006670)
58. 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*. 2010. V.30. P. 201–214. DOI: [10.1051/agro/2009034](https://doi.org/10.1051/agro/2009034)

Поступила в редакцию 01.01.2021

Принята 02.02.2021

Опубликована 19.02.2021

Сведения об авторах:

Капустянчик Светлана Юрьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник сектора интродукции и технологии возделывания сельскохозяйственных культур Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции – филиал «ФИЦ

Институт цитологии и генетики СО РАН», 630501 (Россия, Новосибирская область, р.п. Краснообск); kapustyanchik@bionet.nsc.ru

Якименко Владимир Николаевич – доктор биологических наук, доцент, заведующий лабораторией агрохимии Института почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090 (Россия, г. Новосибирск); yakimenko@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

MISCANTHUS IS A PROMISING RAW MATERIAL, ENERGY AND PHYTOMELIORATIVE CROP (literature review)

© 2020 S.Yu. Kapustyanchik ¹, V.N. Yakimenko²

Address: ¹ Siberian Research Institute for Plant Industry and Breeding, Branch of the Federal Research Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia. E-mail: kapustyanchik@bionet.nsc.ru;

²Institute of Soil Science and Agrochemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

The literature review provides information about one of the most promising energy crops – miscanthus (Miscanthus spp.). Data on the systematics, morphology and phonology of the plant, its yield and the quality of the resulting cellulose-containing raw materials are presented. The possibility of effective cultivation of perennial miscanthus plantations in continental regions, including Russia, is shown. The results of studies of the environmental and phytomeliorative effects of miscanthus plantings on the agricultural landscape are considered. The work on studying the possibilities of obtaining industrial products with high added value from miscanthus biomass is analyzed.

Key words: energy crops; miscanthus; yield; product quality; phytomeliorative effect; industrial processing

How to cite: Kapustyanchik S.Yu., Yakimenko V.N. Miscanthus is promising raw material, energy and phytomeliorative crop // *The Journal of Soils and Environment*. 2020. 3(3). e126. DOI: [10.31251/pos.v3i3.126](https://doi.org/10.31251/pos.v3i3.126) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Bagmet L. V., Dzyubenko E. A. Prediction of the potential cultivation areas of *Miscanthus sacchariflorus* in the Russian Federation, *Vavilovia*. 2019; V.2, No4, p.35-49. (in Russian) DOI: [10.30901/2658-3860-2019-4-35-49](https://doi.org/10.30901/2658-3860-2019-4-35-49)
2. Budaeva V.V., Sevastyanova Yu.I., Gismatulina Yu.A. et al. Features of paper-forming properties of miscanthus cellulose, *Polzunovskii vestnik*, 2015, Vol. 1, No.4, p. 78-82. (in Russian)
3. Bulatkin G.A. Investigation of the efficiency of energy crops on the example of Chinese Miscanthus (*Miscanthus sinensis* Anders.), *Ekologicheskii vestnik Rossii*, 2018, No. 10, p. 36-41. (in Russian)
4. Gismatulina Yu.A., Sevastyanova Yu.V., Budaeva V.V., Zolotukhin V.N. Structural-dimensional characteristics of Miscanthus pulp, *Materials Sc.*, 2015 No. 2, p. 3523-3526. (in Russian)
5. Gushchina V.A., Ostroborodova N.I. Formation of giant miscanthus biomass in the forest-steppe of the middle Volga Region, *Volga Region Farmland*, 2019, No.3 (52), p. 81-87. (in Russian)
6. Dorogina O.V., Vasilyeva O.Yu., Nuzhdina N.S., Buglova L.V., Zhmud E.V., Zueva G.A., Komina O.V., Kuban I.S., Gusar A.S., Dudkin R.V. The formation and the study of a collection of the miscanthus resource species gene pool in the conditions of the West Siberian forest steppe, *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2019, V.23 No7, p. 923-932. DOI: [10.18699/VJ19.568](https://doi.org/10.18699/VJ19.568)
7. Zinchenko V. A., Yashin M. Miscanthus energy, *LesPromInform*, 2011, 6 (80), p. 134 -140. (in Russian)
8. Kapustyanchik S.Yu., Potseluev O.M., Lomova T.G., Bakshaev Yu.D. Productivity and nutritive value of miscanthus varieties "Soranskii" In book: Soil of Russia: yesterday, today, tomorrow: A collection of articles based on the materials of the Rus. Sc. Conf. with Inter. participation dedicated to the Year of Ecology and the 90th anniversary of the birth of Professor V.V. Tyulin. Kirov: VyatGU Publishing House, 2017, p. 84-90. (in Russian)
9. Kapustyanchik S.Yu., Burmakina N.V., Yakimenko V.N. Evaluation of the ecological and agrochemical state of agrocenosis with long-term growing of Miscanthus in Western Siberia, *Agrohimia*, 2020, No. 9, p. 65-73. (in Russian) DOI: [10.31857/S0002188120090082](https://doi.org/10.31857/S0002188120090082)
10. Kapustyanchik S.Yu., Danilova A.A., Likhnenko I.E. Miscanthus acchariflorus in Siberia. Parameters of the production process, dynamics of biophilic elements // *Agricultural Biology*, 2021, No.1, p.25-33. (in print) (in Russian)

11. Fodder plants of hayfields and pastures of the USSR // Ed. Larin I.V., Vol. 1. Spores, gymnosperms and monocots. Leningrad, 1950. 315 p. (in Russian)
12. Sakovich G.V., Skiba E.A., Gladysheva E.K., Golubev D.S., Budaeva V.V. Miscanthus is the feedstock for bacterialnanocellulose production, *Doklady Rossijskoj Akademii Nauk. Himiya, Nauki o Materialah*, 2020, V.495, p.35-38. (in Russian) DOI: [10.131857/S2686953520060138](https://doi.org/10.131857/S2686953520060138)
13. Slynko N.M., Goryachkovskaya T.N., Shekhovtsov S.V., etc. The biotechnological potential of the new crop, Miscanthus CV. Soranovskii, *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2013. V.17, No4/1, p. 765-771. (in Russian)
14. Yurina F.G. Overview of innovations in the technology of bioethanol production In book: Biotechnology and society in the XXI century: Proc. of the Inter. Sc. and Practic. Conf. (Barnaul 2015, 15-18 September) / Il'ichev A.A. (ed.). Barnaul: ASU Publ., 2015, p. 304-307. (in Russian)
15. Baibakova O.V., Skiba E.A. Biotechnological Aspects of Ethanol Biosynthesis from Miscanthus, *Russ J Genet Appl Res*, 2015, V. 5, No. 1, p. 69-74. DOI: [10.1134/S2079059715010025](https://doi.org/10.1134/S2079059715010025)
16. Barney J.N., Mann J.J., Kyser G.B. et al. Tolerance of switchgrass to extreme soil moisture stress: Ecological implications, *Plant Sci.*, 2009, V. 177, Is. 6, p. 724–732. DOI: [10.1016/j.plantsci.2009.09.003](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.09.003)
17. Blanco-Canqui H., Gilley J., Eisenhauer D., Boldt A. Soil carbon accumulation under switchgrass barriers, *Agron. J.*, 2014, V. 106, Is.6, p. 2185–2192. DOI: [10.2134/agronj14.0227](https://doi.org/10.2134/agronj14.0227)
18. Bonin C. L., Heaton E. A., Barb J. Miscanthus sacchariflorus – biofuel parent or new weed?, *Global Change Biology Bioenergy*, 2014, Vol. 6, Is.6, p. 629-636. DOI: [10.1111/gcbb.12098](https://doi.org/10.1111/gcbb.12098)
19. Bonin C.L., Mutege E., Chang H., Heaton E.A. Improved feedstock option or invasive risk? Comparing establishment and productivity of fertile miscanthusgiganteus to miscanthussinensis, *Bioenergy Research*, 2017, V. 10, p. 317-328. DOI: [10.1007/s12155-016-9808-1](https://doi.org/10.1007/s12155-016-9808-1)
20. Budaeva V.V., Makarova E.I., Gismatulina Yu.A. Integrated Flowsheet for Conversion of Non-woody Biomass into Polyfunctional Materials, *Key Engineering Materials*, 2016, V.670, p. 202-206. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.670](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.670)
21. Chen L.M., Stehouwer R., Wu M.L. et al. Minesoil response to reclamation by using a flue gas desulfurization product, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2013. V.77, Is.5, p. 1744–1754. DOI: [10.2136/sssaj2013.02.0054](https://doi.org/10.2136/sssaj2013.02.0054)
22. Clark L.V., Brummer J.E., Glowacka K. et al. A footprint of past climate change on the diversity and population structure of Miscanthus sinensis, *Annals of Botany*, 2014, V. 114, Is.1, p. 97–107. DOI: [10.1093/aob/mcu084](https://doi.org/10.1093/aob/mcu084)
23. Clifton-Brown J.C., Lewandowski I. Water use efficiency and biomass partitioning of three different Miscanthus genotypes with limited and unlimited water supply, *Annals of Botany*, 2000, V. 86, Is.1, p. 191 -200. DOI: [10.1006/anbo.2000.1183](https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1183)
24. Di Nasso N.N.O., Lasorella M.V., Roncucci N., Bonari E. Soil texture and crop management affect switchgrass (*Panicum virgatum* L.) productivity in the Mediterranean // *Ind. Crops Prod*, 2015, V.65, p. 21–26. DOI: [10.1016/j.indcrop.2014.11.017](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.017)
25. Dufoss K., Drewerc J., Gabrielle B., Droueta J.-L. Effects of a 20-year old *Miscanthus* × *giganteus* stand and its removal on soil characteristics and greenhouse gas emissions, *Biomass and bioenergy*, 2014, V.69, p. 198–210. DOI: [10.1016/j.biombioe.2014.07.003](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.07.003)
26. 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, V. 63, Is.6, p. 2241–2246. DOI: [10.11118/actaun201563062241](https://doi.org/10.11118/actaun201563062241)
27. Foereid B., Neergaard A., Henning H.J. Turnover of organic matter in a Miscanthus field: Effect of time in Miscanthus cultivation and inorganic nitrogen supply, *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, V.36, Is.7, p. 1075–1085. DOI: [10.1016/j.soilbio.2004.03.002](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.03.002)
28. Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Veprev S.G., Sakovich G.V., Shumny V.K. Cellulose from Various Parts of Soranovskii Miscanthus, *Russ J Genet Appl Res*, 2015, V.5, No.1, p. 60-68. DOI: [10.1134/S2079059715010049](https://doi.org/10.1134/S2079059715010049)
29. Blanco-Canqui H. Growing dedicated energy crops on marginal lands and ecosystem services, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 2016, V. 80, Is.4, p. 845–858. DOI: [10.2136/sssaj2016.03.0080](https://doi.org/10.2136/sssaj2016.03.0080)
30. 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, Is.3, p. 202–209. DOI: [10.1016/j.copbio.2008.05.001](https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.05.001)
31. 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. DOI: [10.1023/A:1004244614537](https://doi.org/10.1023/A:1004244614537)
32. Hodkinson, T.R., Chase M.W., Takahashi C. et al. The use of dna sequencing (ITS and trnL-F), AFLP, and fluorescent in situ hybridization to study allopolyploid *Miscanthus* (Poaceae), *American Journal of Botany*, 2002, V. 89, No2, p. 279-286. DOI: [10.3732/ajb.89.2.279](https://doi.org/10.3732/ajb.89.2.279)
33. Hurter B. Nonwood fibers offer potential opportunity for papermakers, *TAPPI J.*, 2014, V. 13, No6, p. 5–6.
34. Jones M.B., Finnan J., Hodkinson T.R. Morphological and physiological traits for higher biomass production in perennial rhizomatous grasses grown on marginal land, *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, V.7. Is.2. p.375-385. DOI: [10.1111/gcbb.12203](https://doi.org/10.1111/gcbb.12203)

35. Kalinina O., Nunn C., Sanderson R. et al. Extending *Miscanthus* Cultivation with Novel Germplasm at Six Contrasting Sites, *Front. Plant Sci.*, 2017, V.8, p.563. DOI: [10.3389/fpls.2017.00563](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00563)
36. Krizek D.T., Ritchie J.C., Sadeghi A.M. et al. A four-year study of biomass production of eastern gamagrass grown on an acid compact soil, *Soil Sci. Plant Anal.*, 2003, V. 34, p. 457–480. DOI: [10.1081/CSS-120017832](https://doi.org/10.1081/CSS-120017832)
37. Lewandowski I., Kicherer A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*, *Eur. J. of Agron.*, 1997, V.6, Is.3-4, p. 163–177. DOI: [10.1016/S1161-0301\(96\)02044-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(96)02044-8)
38. Lewandowski I., Clifton-Brown J.C., Scurlock J.M.O. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop, *Biomass and Bioenergy*, 2000, V.19, Is.4, p. 209–227. DOI: [10.1016/S0961-9534\(00\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00032-5)
39. Lewandowski I., Clifton-Brown J.C., Andersson B. et al. Environment and harvest time affects the combustion qualities of *Miscanthus* genotypes, *Agr. J.* 2003, V.95, Is.5, p.1274–1280. DOI: [10.2134/agronj2003.1274](https://doi.org/10.2134/agronj2003.1274)
40. Lewandowski I., Scurlock J.M.O., Lindvall E., Myrsini C. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe, *Biomass and Bioenergy*, 2003, V.25, Is.4, p. 335–361. DOI: [10.1016/S0961-9534\(03\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00030-8)
41. Lewandowski I., Clifton-Brown, J., Trindade, L. M. et al. Progress on optimizing *Miscanthus* biomass production for the European bioeconomy: results of the EU FP7 project OPTIMISC, *Front. Plant Sci.*, 2016, V.7, p. 1–23. DOI: [10.3389/fpls.2016.01620](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01620)
42. Marra M., Keene T., Skousen J., Griggs T. Switchgrass yield on reclaimed surface mines for bioenergy production, *J. Environ.*, 2013, V.42, Is.3, p. 696–703. DOI: [10.2134/jeq2012.0453](https://doi.org/10.2134/jeq2012.0453)
43. Masters M.D., Black C.K., Kantola I.B. et al. Soil nutrient removal by four potential bioenergy crops: *Zea mays*, *Panicum virgatum*, *Miscanthus x giganteus* and prairie, *Agric Ecosyst Environ.*, 2016, V. 216, p. 51–60. DOI: [10.1016/j.agee.2015.09.016](https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.016)
44. Maughan M. *Miscanthus x giganteus* productivity: the effects of management in different environments, *Global Change Biology Bioenergy*, 2012, V.4, Is.3, p. 253–265. DOI: [10.1111/j.1757-1707.2011.01144.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01144.x)
45. Naidu S.L., Moose S.P., Al-Shoaibi A.K. et al. Gold tolerance in *Miscanthus x giganteus*: adaptation in amounts and sequence of C4 photosynthetic enzymes, *Plant Physiology*, 2003, V. 132, p. 1688–1697.
46. Nijssen M., Smeets E., Stehfest E. et al. An evaluation of the global potential of bioenergy production on degraded lands, *Global Change Biology Bioenergy*, 2012, No4, Is. 2, p. 130–147. DOI: [10.1111/j.1757-1707.2011.01121.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01121.x)
47. Nunn C., Hastings A., Kalinina O. et al. Environmental influences on the growing season duration and ripening of diverse *Miscanthus* germplasm grown in six countries, *Front. Plant Sci.*, 2017, No8, p.1–14. DOI: [10.3389/fpls.2017.00907](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00907)
48. Pidlisnyuk V., Erickson L., Kharchenko S., Stefanovska T. Sustainable land management: growing miscanthus in soils contaminated with heavy metals, *J. Environ. Prot.*, 2014, V.5, No8, p. 723–730. DOI: [10.4236/jep.2014.58073](https://doi.org/10.4236/jep.2014.58073)
49. Robertson A.D., Davies Ch. A., Smith P. et al. Carbon inputs from *Miscanthus* displace older soil organic carbon without inducing priming, *Bioenerg. Res.*, 2017, V. 10, p. 86–102. DOI: [10.1007/s12155-016-9772-9](https://doi.org/10.1007/s12155-016-9772-9)
50. Schmer M.R., Xue Q., Hendrickson J.R. Salinity effects on perennial, warm-season (C4) grass germination adapted to the northern Great Plains, *Can. J. Plant Sci.*, 2012, V. 92, No5, p. 873–881. DOI: [10.4141/cjps2012-001](https://doi.org/10.4141/cjps2012-001)
51. Smith L.L., Barney J.N. The relative risk of invasion: Evaluation of *Miscanthus x giganteus* seed establishment, *Invasive Plant Science and Management*, 2014, V.7, No1, p. 93–106. DOI: [10.1614/IPSM-D-13-00051.1](https://doi.org/10.1614/IPSM-D-13-00051.1)
52. Tubeilen F., Rennie T.J., Goss M.J. A review on biomass production from C4 grasses: yield and quality for end-use, *Current Opinion in Plant Biology*, 2016, V. 31, p. 172–180. DOI: [10.1016/j.pbi.2016.05.001](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.05.001)
53. Venuto B.C., Daniel J.A. Biomass feedstock harvest from Conservation Reserve Program land in northwestern Oklahoma, *Crop Sci.*, 2010, V. 50, Is.2, p. 737–743. DOI: [10.2135/cropsci2009.11.0641a](https://doi.org/10.2135/cropsci2009.11.0641a)
54. Wang C., Kong Y., Hu R., Zhou G. *Miscanthus*: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production, *Global Change Biology Bioenergy*, 2020, V. 13, Is.1, p.1–12. DOI: [10.1111/gcbb.12761](https://doi.org/10.1111/gcbb.12761)
55. Wilson D.M., Dalluge D.L., Rover M. et al. Crop management impacts biofuel quality: influence of switchgrass harvest time on yield, nitrogen and ash of fast pyrolysis products, *Bioenerg. Res.*, 2013, V. 6, p. 103–113. DOI: [10.1007/s12155-012-9240-0](https://doi.org/10.1007/s12155-012-9240-0)
56. Yan J., Chen W., Luo F. et al. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication, *GGB Bioenergy*, 2012, V.4, Is.1, p. 49–60. DOI: [10.1111/j.1757-1707.2011.01108.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01108.x)
57. Zhuo Y., Zhang Y.F., Xie G.H., Xiong S.J. Effects of salt stress on biomass and ash composition of switchgrass (*Panicum virgatum*), *Acta Agric. Scand. Sect.*, 2015, V.65, p.300–309. DOI: [10.1080/09064710.2015.1006670](https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1006670)
58. 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*, 2010, V.30, p. 201–214. DOI: [10.1051/agro/2009034](https://doi.org/10.1051/agro/2009034)

Received 11 January 2021

Accepted 05 February 2021; published 19 February 2021

About the authors:

Kapustyanchik Svetlana Yu. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Sector of introduction and technologies of cultivation of agricultural crops in the Siberian Research Institute for Plant Industry and Breeding, Branch of the Federal Research Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Russia); kapustyanchik@bionet.nsc.ru

Yakimenko Vladimir N. – Doctor of Biological Sciences, Head in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Science (Novosibirsk, Russia); yakimenko@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)