

**КУЛЬТИВИРОВАНИЕ *Miscanthus sacchariflorus* В СИБИРИ:
ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ***С.Ю. КАПУСТЯНЧИК¹ ✉, А.А. ДАНИЛОВА^{1, 2}

Многолетние энергетические растения, в том числе мискантус (*Miscanthus* spp.), культивируют в промышленных масштабах для производства биоэнергии и технических целей. Установлено, что даже при низких затратах возможна высокая продуктивность культуры. В России проблема выращивания мискантуса для получения биомассы слабо разработана, а особенности применения удобрений под эту культуру практически не исследованы. Мискантус — для Сибири культура новая. Проблема применения удобрений под посадками мискантуса остается недостаточно изученной из-за разнообразия климатических и почвенных условий, а также видовых особенностей культуры. При этом основная часть публикаций посвящена виду *M. giganteus*, который отличается от вида *M. sacchariflorus* по строению корневой системы. В настоящей работе для условий Сибири впервые представлены многолетние экспериментальные данные по комплексу проблем, связанных с применением азотных удобрений под мискантусом. Установлено, что последние, не влияя на урожайность, снижают качество сырья из-за повышения доли листьев в фитомассе и увеличения пораженности корневищ фузариозной инфекцией. Также установлено снижение накопления органического вещества в удобренных почвах в сравнении с неудобренными. Цель настоящей работы — определить целесообразность применения азотных удобрений под многолетними посадками мискантуса, культивируемого для получения биомассы в континентальных условиях Сибири, в частности оценить влияние удобрений на урожайность культуры, пораженность растений фитопатогенами, динамику органического вещества в почве. Исследования провели на территории научно-экспериментальной базы СибНИИРС — филиал ИЦиГ СО РАН (Новосибирская обл., Центральная лесостепь Новосибирского Приобья). Влияние азотного удобрения на величину и структуру урожая *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский оценивали в начальный период формирования плантации (2016–2017 годы) и в период ее зрелости (2018–2022 годы). Плантация общей площадью 0,3 га состояла из 4 блоков, каждый из которых включал варианты с дозами удобрений N₀, N₃₀, N₆₀, N₉₀, N₁₂₀ на фоне P₆₀K₃₀ в 4-кратной повторности. Азотные удобрения в виде аммиачной селитры вносили ежегодно весной. В качестве посадочного материала использовали корневища *M. sacchariflorus*. Надземную фитомассу отбирали на площадках размером 0,25 м². Учет подземной фитомассы проводили методом монолитов в стадии отмирания надземной части растений. Визуально оценивали степени зараженности отмытых корневищ по стандартным и модифицированным шкалам. Накопление общего углерода (C_{орг}) учитывали, сравнивая показатель в почве под паром (исходная почва) и под 8-летней плантацией мискантуса (2023 год). Количество накопленного мобильного почвенного органического вещества (ПОВ) за период роста мискантуса определяли по результатам сравнения продукции C-CO₂ образцами почв, отобранными под многолетними посадками мискантуса и однолетним паром (исходная почва). Интенсивность накопления нитратного азота в почве анализировали в условиях лабораторного опыта в оптимальных гидротермических условиях по общепринятому методу Кравкова. За 6–7-летний период посадок *M. sacchariflorus* сорта Сорановский запас надземной фитомассы достиг в среднем 12,0 т/га, подземной — 18,0 т/га. Эти показатели близки к средним, характерным для этого вида в мире. Азотное удобрение, не оказывая влияния на накопление фитомассы, способствовало изменению ее структурных элементов. В период формирования плантации под влиянием азотного удобрения наблюдали снижение длины генеративного побега в среднем на 5 %, числа и биомассы метелок на 35 %, повышение облыственности на 9 % в сравнении с вариантом без удобрений. В период зрелости плантации отклонения от контроля приобрели более выраженный характер, особенно при дозах удобрений выше N₆₀. В вариантах опыта с внесением азотных удобрений наблюдали повышение пораженности корневищ грибной инфекцией (15,5 против 7,7 % без удобрений). Основными возбудителями были грибы рода *Fusarium* — *F. oxysporum* и *F. graminearum*. За 8 лет в почве под плантацией мискантуса ежегодно накапливалось 150–200 кг C/га мобильного ПОВ и около 0,05 % общего углерода, что соответствует показателям, характерным для традиционных многолетних трав. Скорость накопления углерода в почве не росла по мере увеличения возраста плантации. Внесение N₁₂₀ привело к снижению величины накопления мобильного ПОВ примерно на 50 % в сравнении с фоном без удобрений (104 против 220 кг C/га в год при N₀). Осенью в период отмирания надземной фитомассы содержание минерального азота в почве во всех вариантах опыта было низким. При этом минерализационный потенциал почвы возрастал по мере увеличения дозы азота. Таким образом, азотные удобрения не способствовали повышению урожайности *M. sacchariflorus* при выращивании на агросерой почве Приобья, приводили к увеличению пораженности корневищ фузариозной гни-

* Работа поддержана бюджетным проектом ИЦиГ СО РАН № FWNR-2022-0018.

лю и снижали темпы накопления органического вещества в почве. Следовательно, в условиях Центральной лесостепи Новосибирского Приобья применение азотных удобрений при культивировании *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский нецелесообразно.

Ключевые слова: энергетические растения, *Miscanthus sacchariflorus*, сорт Сорановский, надземная фитомасса, подземная фитомасса, азотные удобрения, грибы рода *Fusarium*, накопление органического вещества в почве.

Азот — основной элемент, ограничивающий продуктивность культивируемых растений. При разработке технологии производства мискантуса (*Miscanthus* spp.) — новой культуры для Сибири — приобретает актуальность вопрос о необходимости применения и дозах внесения азотных удобрений. Их использование обычно преследует две основные цели — повышение урожайности и улучшение состава сырья в зависимости от целей его переработки.

В экспериментах, проведенных I.F. Shield с соавт. (1) на Ротамстедской опытной станции (Rothamsted Research, Великобритания) на супесчаных почвах с низким плодородием при содержании минерального азота в почве весной от 30 до 40 кг/га, оптимальная доза удобрения составила N₁₀₀, что увеличивало урожайность мискантуса гигантского (*M. giganteus*) на 3,9 т/га сухого вещества до 13,5±0,46 т/га, а среднюю валовую прибыль — на 132 £/га по сравнению с контролем без внесения азота (1). В. Dubis с соавт. (2) также сообщают, что внесение NPK эквивалентно дозе N₁₆₀ увеличивало выход этанола из биомассы *M. giganteus* на 40 %. Однако азотные удобрения могут способствовать повышению зольности биомассы мискантуса, что снижает качество сырья, используемого для сжигания (3).

По результатам метаанализа имеющихся сведений, отклик урожайности *M. giganteus* отмечался при дозах от N₆₀ до N₃₀₀, величина этого отклика снижалась по мере увеличения длительности внесения удобрения (4). Отзывчивость мискантуса на азотные удобрения в сравнении с другими энергетическими культурами ниже и сильно зависит от свойств почвы и климатических условий (5). В целом по результатам многолетних исследований за рубежом прибавка урожайности мискантуса от внесения азотных удобрений колебалась от 0 до 40 % (6). Сделан вывод о том, что поскольку урожайность мискантуса сильно реагирует на изменения климата, потребности в питательных веществах будут меняться, следовательно, для обеспечения устойчивого производства биоэнергии нужны рекомендации по минимальному применению азотных удобрений.

Кроме того, при применении азотных удобрений в посадках мискантуса следует проявлять осторожность, учитывая экологические проблемы: выбросы N₂O могут нивелировать эффект секвестрации углерода (7, 8). Также имеются сведения, что многолетняя культура мискантуса не нуждается в удобрении (9-11) и перспективна для сокращения потерь азота в районах с преобладанием однолетних пропашных культур (12). Вывод об отсутствии необходимости в удобрениях связывают с особенностями реутилизации биофильных элементов культурой (11).

Следует отметить, что проблема применения удобрений под посадками мискантуса остается недостаточно изученной из-за разнообразия климатических и почвенных условий, а также видовых особенностей культуры, при этом основная часть публикаций посвящена виду *M. giganteus*.

Растущий интерес к выращиванию мискантуса в последние годы стимулировал исследования по выявлению патогенов этой энергетической культуры. Ряд авторов отмечали ее устойчивость к болезням и вредителям (13-15). Изучали заболевания мискантуса, вызванные вирусом желтой карликовости ячменя (16, 17), увядание и пораженность листьев, вызванные

Leptosphaeria sp. (Канада, США, Япония) (18), вирусы, вызывающие мозаики у мискантуса — *Sorghum mosaic virus* (SrMV), *Switchgrass mosaic virus* (19, 20). Сообщалось о фузариозной корневой гнили, негативно влияющей на укоренение мискантуса (21). При этом сведений о влиянии азотных удобрений на фитопатогены мискантуса недостаточно. Как известно, применение таких удобрений часто сопровождается повышением пораженности злаковых культур болезнями (22, 23).

Важная цель культивирования мискантуса — секвестрация атмосферного углерода. Проводятся исследования динамики углерода в почве под посадками мискантуса. Сделаны прогнозные оценки объемов закрепления углерода в почвах разных стран до 2090 года (24, 25), отмечают несоответствие ожидаемых величин накопления углерода в почве с реально наблюдаемыми в полевых опытах (26, 27), устанавливают причины этого (28, 29), оценивают величину повышения эмиссии парниковых газов после перевода многолетних плантаций мискантуса в пахотные угодья (30).

Ранее мы показали наличие объективных предпосылок для накопления органического вещества под молодыми посадками мискантуса в условиях Приобья (31). Однако проблема влияния азотных удобрений на этот процесс остается слабо изученной.

Известно, что положительное влияние удобрений на изменение содержания углерода в почве связано с повышением количества поступающей биомассы. В то же время снижение соотношения C:N способствует интенсификации минерализационных потерь углерода. На примере зерновых злаков показано, что баланс этих разнонаправленных процессов приводит к тому, что при использовании минеральных удобрений в экономически приемлемых дозах содержание органического углерода (C_{org}) в почве возрастает не более чем на 0,1-0,2 абсолютных процента (32).

На территории Российской Федерации осуществляется начальный этап культивирования мискантуса, поэтому обозначенные выше вопросы остаются практически неизученными.

В настоящей работе для условий Сибири впервые установлено, что азотных удобрений не влияют на урожайность мискантуса, но снижают качество получаемого сырья из-за увеличения доли листьев в фитомассе и большей пораженности корневищ фузариозной инфекцией. Также при применении удобрений уменьшается накопление органического вещества в почве в сравнении с вариантами без удобрений.

Цель настоящей работы — определить целесообразность применения азотных удобрений под многолетними посадками мискантуса, культивируемого для получения биомассы в континентальных условиях Сибири, а также оценить влияние удобрений на урожайность культуры, пораженность растений фитопатогенами, динамику органического вещества в почве.

Методика. Исследования проводили на территории научно-экспериментальной базы СибНИИРС — филиала ИЦиГ СО РАН (Новосибирская обл., центральная лесостепь Новосибирского Приобья).

Закладку полевых опытов, наблюдения и оценку результатов осуществляли согласно методическим рекомендациям (34). Плотность общей площадью 0,3 га состояла из 4 блоков, каждый из которых включал варианты N_0 (контроль без удобрений), N_{30} , N_{60} , N_{90} , N_{120} на фоне $P_{60}K_{30}$ в 4-кратной повторности. Азотные удобрения в виде аммиачной селитры вносили ежегодно весной.

В качестве посадочного материала использовали корневища *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский (выведен Институтом цитологии и генетики СО РАН и внесен в Государственный реестр селекционных дости-

жений; авторское свидетельство № 58540) (31).

Почва — агросерая типичная (33). Географические координаты разреза: 54°53'13,5"N, 82°59'36,7"E. Мощность гумусового горизонта составляла 30–35 см, содержание гумуса — 3,14 % по Тюрину, гидролитическая кислотность — 0,5–1,5 мг-экв/100 г почвы по Каппену в модификации ЦИ-НАО, содержание обменных кальция и магния — в среднем 70 % от емкости катионного обмена.

Влияние азотного удобрения на величину и структуру урожая мискантуса оценивали в начальный период формирования плантации (2016–2017 годы) и в период ее зрелости (2018–2022 годы).

Надземную фитомассу отбирали на площадках размером 0,25 м² в 4-кратной повторности по фазам развития культуры. Учет подземной фитомассы для оценки пораженности корневищ фитопатогенами проводили в апреле-мае 2021 года методом монолитов (10×10×25 см). В трех повторностях опыта в каждом из 4 блоков отбирали по 5 монолитов, из которых делали среднюю пробу ($n = 12$). Корневища мискантуса отмывали из почвы водой на сите с диаметром ячеек 0,25 мм. На отмывках корневищах проводили визуальную оценку степени их зараженности по стандартным и модифицированным шкалам (35, 36). Грибы из образцов корневищ выделяли по стандартной методике (37). Видовую принадлежность определяли по морфологическим признакам колоний и спор: по скорости роста, окраске мицелия и его структуре, по форме, размерам апикальной и базальной клеток макроконидий; по наличию микроконидий (38–40).

Накопление общего углерода ($C_{орг}$) оценивали сравнением показателей в почве под паром (исходное значение) и под 8-летней плантацией мискантуса (2023 год) (31). Количество мобильного органического вещества почвы (ПОВ) за период роста мискантуса определяли на основании данных о продукции $C-CO_2$ (углерод в составе углекислого газа) образцами почв, отобранными под многолетними посадками мискантуса и в почве под одолетним паром (исходная почва) (31). Продуцирование $C-CO_2$ в лабораторных условиях определяли по прописи (41). Опыт продолжали до той стадии, когда интенсивность процесса в почве под мискантусом выравнивалась с показателями почвы под паром. Допускали, что к этому времени весь накопившийся под мискантусом запас легкоминерализуемого органического вещества выделился из почвы в виде CO_2 . Количество последнего рассчитывали по разности между суммарными величинами $C-CO_2$, выделившегося из почвы под мискантусом и под паром (31). Повторность опыта 3-кратная. Интенсивность накопления нитратного азота в образцах почвы, отобранных осенью 2023 года, определяли в лаборатории в оптимальных гидротермических условиях по общепринятому методу Кравкова (42) в 3-кратной повторности. Оценка проводили по слоям почвы 0–10 и 10–20 см.

Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли в программе Statistica 10 («StatSoft Inc.», США) по прописи трехфакторного дисперсионного анализа (факторы — год, ярус, удобрение). Результаты представлены в виде средних (M) и стандартных ошибок средних ($\pm SEM$). При уровне значимости (p) строго ниже 0,05 влияние фактора считается достоверным.

Результаты. По данным метеостанции АМС Огурцово (54°52'42"N, 83°00'22"E) (рис. 1), в вегетационные периоды (май-сентябрь) в 2016, 2019 и 2021 годах сумма осадков составила соответственно 231, 248 и 231 мм, сумма температур воздуха выше 10 °C ($\Sigma T, ^\circ C$) — 2478, 2283 и 2380 °C; в 2017, 2018 и 2020 годах сумма осадков — 316, 297 и 314 мм, сумма температур воздуха выше 10 °C — 2340, 2199 и 2493 °C; в 2022 году сумма осадков —

150 мм, сумма температур воздуха выше 10 °С — 2420 °С (при среднемного-летних значениях 263 мм и 2248 °С). Согласно классификации ГТК по Селянину, вегетационные периоды 2015-2021 годов были умеренно увлажненными (ГТК за период с мая по сентябрь составлял 1-1,3), 2022 год — засушливым (ГТК за этот же период — 0,6).

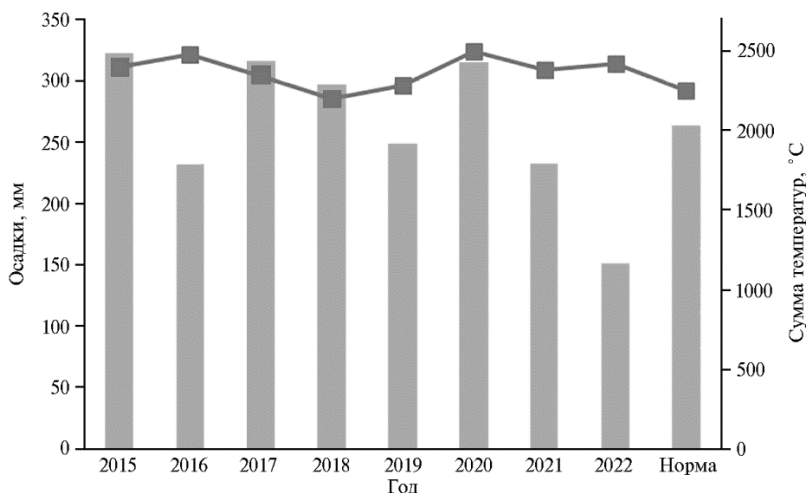


Рис. 1. Характеристика метеоусловий в период исследований: диаграмма — сумма осадков за май-сентябрь, график — сумма температур воздуха выше 10 °С (ΣT) (по данным метеостанции АМС Огурцово, 54°52'42"N, 83°00'22"E).

В начальный период формирования плантации урожайность мискантуса составила в среднем по всем вариантам за 2016-2017 годы 14,4±1,5 т/га, в стадии зрелости плантации (2018-2021 годы) — 12,0±1,2 т/га (табл. 1). Различие в урожайности культуры на разных этапах развития плантации было недостоверным. Влияние азотного удобрения на урожайность мискантуса независимо от дозы было недостоверным за 2016-2021 годы: уровень значимости влияния фактора «удобрение» (p) составлял 0,22-0,77.

1. Продуктивность *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский в зависимости от дозы азотных удобрений ($M \pm SEM$; Новосибирская обл.)

Показатель	N ₀ (контроль)	N ₃₀	N ₆₀	N ₉₀	N ₁₂₀	p	Δx , %
2016-2017 г о д ы ($n = 8$)							
Урожайность, т/га	13±1,4	16±1,5	14±1,5	14±1,2	15±1,5	0,764	0
Длина генеративного побега, см	230±5,7	219±4,2	214±3,1	218±3,0	212±3,8	0,003	-5
Число стеблей, шт/м ²	172±18,7	164±12,6	178±13,8	196±21,1	179±17,6	0,649	0
Число метелок, шт/м ²	94±10,1	94±10,3	52±11,6*	70±15,2*	58±6,1*	0,003	-36
Масса метелок, г/м ²	31±3,4	27±3,0	20±2,9*	21±2,8*	16±2,6*	0,002	-35
Масса листьев, г/м ²	715±83,4	579±48,7	663±27,9	721±67,3	700±60,0	0,412	0
Масса стеблей, г/м ²	773±57,0	659±46,0	600±35,7	777±72,0	714±57,9	0,113	0
Облиственность, %	46±1,7	45±1,8	51±1,5*	47±0,8	48±0,6	0,040	+9
2018-2021 г о д ы ($n = 16$)							
Урожайность, т/га	12±0,7	13±0,9	13±0,9	12±1,0	11±1,0	0,726	0
Длина генеративного побега, см	205±6,7	216±5,6	201±6,6	184±5,6*	191±5,5*	0,002	-10
Число стеблей, шт/м ²	208±22,5	224±14,8	218±9,9	219±13,6	247±21,3	0,360	0
Число метелок, шт/м ²	75±16,0	86±19,9	51±15,0	12±4,8*	11±5,7*	0,000	-80
Масса метелок, г/м ²	35±11,1	23±4,8	21±7,3	2±1,0*	6±2,8*	0,000	-80
Масса листьев, г/м ²	406±48,5	554±55,9	558±64,7	554±58,3	684±68,0*	0,032	+70
Масса стеблей, г/м ²	620±71,1	859±64,7	728±74,5	630±5,7	724±87,0	0,147	0
Облиственность, %	38±1,3	38±2,1	42±3,3	49±2,5*	49±1,6*	0,001	+30

Пр и м е ч а н и е. p — уровень значимости влияния фактора «удобрение». Δx — максимальное изменение показателя в сравнении с контролем.

* Различия с контролем статистически значимы при $p < 0,05$.

Азотное удобрение, не оказывая влияния на накопление фитомассы мискантуса, способствовало изменению ее структурных элементов.

В период формирования плантации под влиянием азотного удобрения наблюдали снижение длины генеративного побега в среднем на 5 % ($p = 0,003$), числа и биомассы метелок на 35 % ($p = 0,002$), повышение облиственности на 9 % ($p = 0,04$) в сравнении с вариантом без удобрений. В период зрелости плантации отклонения от контроля приобрели более выраженный характер, особенно при дозах удобрений выше N_{60} . Так, число и биомасса метелок снижались в сравнении с контролем (уменьшение до 80 %, $p = 0,000$) только на фоне N_{120} . В остальных вариантах показатель не отличался от контроля. Подобную закономерность наблюдали по биомассе листьев и по облиственности, когда показатели выросли соответственно на 70 и 30 % ($p = 0,032$ и $p = 0,001$) в сравнении с вариантом N_0 .

Таким образом, внесение доз удобрений выше N_{60} сопровождалось увеличением доли листьев в биомассе мискантуса. Это обстоятельство может снижать качество получаемого сырья. Как известно, на переработку идут именно стебли мискантуса. При применении удобрений надземная биомасса оставалась зеленой более длительный период в сравнении с неудобренным фоном, также наблюдалось полегание растений вследствие вытягивания стебля. Значительное снижение биомассы метелок свидетельствует о торможении формирования репродуктивных органов под влиянием азотного удобрения.

Результаты исследований за 2022 год отличались от описанных выше. В условиях острого недостатка влаги и аномально высоких для условий Приобья температур воздуха урожайность мискантуса на фоне N_0 составила $4,1 \pm 0,6$ т/га, что было примерно в 3 раза ниже среднегодового показателя. В этих условиях при дозах N_{60} и выше наблюдали достоверно более высокую урожайность культуры — $7,1 \pm 0,5$ т/га. Это происходило преимущественно за счет увеличения биомассы листьев. Так, средний показатель при N_{60} – N_{120} составил 415 г/м^2 против 283 г/м^2 в контроле, то есть повышение составило не менее 40 %. В 2022 году репродуктивные органы у мискантуса не сформировались. Таким образом, в один год из семи лет наблюдений в при крайне низкой продуктивности мискантуса отмечали прибавки урожайности от внесения азотного удобрения. В типичных для Приобья климатических условиях влияния азотного удобрения на урожайность культуры мы не обнаружили.

2. Общая биомасса и пораженность корневищ *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский в зависимости от дозы азотных удобрений ($n = 12$, $M \pm \text{SEM}$; Новосибирская обл., осень 2021 года)

Вариант опыта	Биомасса корневищ, т/га	Доля пораженных корневищ, %
N_0 (контроль)	$13 \pm 1,8$	$8 \pm 2,4$
N_{30}	$20 \pm 2,9$	$8 \pm 2,6$
N_{60}	$23 \pm 4,4$	$15 \pm 3,6$
N_{90}	$18 \pm 1,4$	$15 \pm 2,4$
N_{120}	$22 \pm 2,6$	$16 \pm 3,3$
p	0,058	0,007

Примечание. p — уровень значимости влияния фактора «удобрение».

Важный компонент производственного процесса мискантуса — формирование корневищ. Как мы показали ранее (31), корневища служат резервуаром биофильных элементов, обеспечивающим практически замкнутый их круговорот в фитоценозе мискантуса. В настоящем исследовании мы наблюдали устойчивую тенденцию к увеличению биомассы корневищ на фоне внесения удобрений в сравнении с контролем (табл. 2). При этом, как показали наблюдения, проведенные на 7-й год жизни плантации, дозы азотного удобрения выше N_{30} приводили к увеличению пораженности корневищ грибной инфекцией почти в 2 раза ($p = 0,007$) в сравнении с

контролем без удобрений (см. табл. 2). На корневищах отмечали обширную мягкую гниль и отсутствие жизнеспособных корней и почек. На поперечных срезах корневищ наблюдали изменение цвета корковых и внутренних тканей. Комплекс патогенов, вызывающих гниль корневищ мискантуса, был представлен преимущественно двумя видами рода *Fusarium* — *F. oxysporum* и *F. graminearum* (данные таксономического определения комплекса патогенов не приведены).

Увеличение фитомассы подземных органов культуры при применении удобрений не сопровождалось соответствующим накоплением мобильного органического вещества в почве (ПОВ). Так, величина этого показателя в слое почвы 0-10 см по вариантам N₀, N₃₀, N₆₀, N₁₂₀ составила ряд 740±10, 400±40, 415±80, 590±80 кг С/га за 8 лет ($n = 3, M \pm SEM, p = 0,02$). То есть внесение азотных удобрений, независимо от дозы, привело к снижению запаса мобильного органического вещества в почве в сравнении с контролем без удобрений.

Для уточнения особенностей этого явления мы изучили продукцию CO₂ в образцах почвы в качестве показателя содержания в ней легкоминерализуемого мобильного органического вещества (рис. 2).

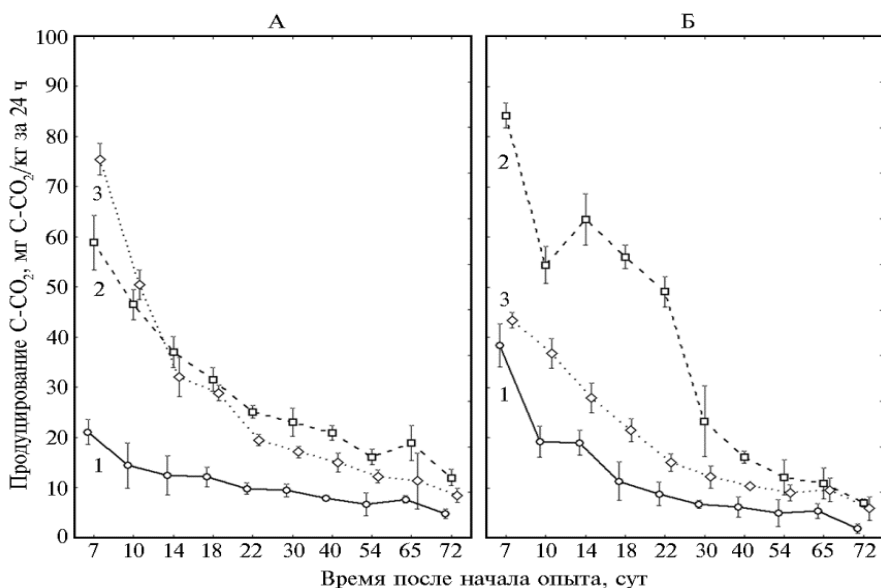


Рис. 2. Продукция C-CO₂ под 8-летними посадками *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский в слое почвы 0-10 см (А) и 10-20 см (Б) в зависимости от внесения удобрений: 1 — пар, исходная почва, на которой была заложена плантация, 2 — посадки мискантуса без внесения удобрения, 3 — посадки мискантуса при внесении N₁₂₀ ($n = 3, M \pm SEM$; Новосибирская обл., май 2023 года).

В слое 0-10 см через 7 сут после начала опыта (первый срок наблюдений) вариант N₁₂₀ по дыхательной активности достоверно превосходил вариант N₀. Однако это превышение быстро нивелировалось, и со второго срока наблюдений (10 сут после начала опыта) в варианте N₁₂₀ наблюдалась меньшая активность в сравнении с N₀. Из этого следует, что мобильное органическое вещество на фоне удобрений было более доступно для разложения в сравнении с неудобренным фоном. В слое почвы 10-20 см активность продукции CO₂ в варианте N₀ была стабильно выше, чем в варианте N₁₂₀. То есть в этом слое внесение N₁₂₀ не приводило к накоплению биомассы. Известно, что в слое почвы 10-20 см под многолетними травами содержание растительных остатков разной степени разложения обычно

выше, чем в верхнем слое (46). В нашем опыте эта закономерность была хорошо заметна при N₀, чего не наблюдалась на удобренном фоне.

Объяснение этому мы обнаружили при оценке интенсивности нитрификации как показателя активности минерализационных процессов. Осенью в период отмирания надземной фитомассы содержание минерального азота в почве во всех вариантах опыта было низким (табл. 3). При этом минерализационный потенциал почвы возрастал по мере увеличения дозы азота. Так, в слое 0-10 см в варианте N₁₂₀ за 14 сут накопилось 53,4 мг N-NO₃/кг против 1,7 мг N-NO₃/кг в варианте N₀; в слое 10-20 см показатель в варианте N₁₂₀ превышал таковой в вариант N₀ примерно в 3,5 раза. Следовательно, меньшее накопление мобильного ПОВ в слое почвы 10-20 см на фоне N₁₂₀ в сравнении с N₀, наряду с другими возможными причинами, связано с быстрой минерализацией поступающей фитомассы в присутствии удобрений.

3. Интенсивность нитрификации в почве под многолетними посадками *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский по вариантам опыта (n = 3, M±SEM; Новосибирская обл., октябрь 2023 года)

N-NO ₃ , мг/кг	Слой, см	Вариант опыта			
		N ₀ (контроль)	N ₃₀	N ₆₀	N ₁₂₀
Исходное содержание	0-10	1,1	2,5	5,0	1,7
	10-20	1,3	3,7	3,4	2,5
Накопление за 14 сут	0-10	2±0,6	6±1,8	17±4,9	53±19,0
	10-20	3±2,9	2±1,2	7±3,9	10±11,0

За 8 лет накопление мобильного органического вещества на фоне азотного удобрения было примерно на 50 % ниже, чем на неудобренном фоне (табл. 4). При этом азотные удобрения не влияли на содержание общего углерода.

4 Накопление органического вещества в почве под 8-летними посадками *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский (n = 3, M±SEM; Новосибирская обл., октябрь 2023 года)

Слой, см	Почва под паром	Почва под мискантусом (8-летние посадки)	
		N ₀ (контроль)	N ₁₂₀
Показатель Сорг., %			
0-10	1,6±0,2	1,8±0,2	1,8±0,2
10-20	1,4±0,2	1,7±0,2	1,7±0,2
В среднем в слое 0-20 см	1,5	1,7	1,7
Накопление за 8 лет		0,45	0,45
Накопление за год		0,05	0,05
Мобильное органическое вещество, кг С/га			
0-10	540±40	1330±60	1140±60
10-20	600±40	1550±60	830±60
Сумма в слое 0-20 см	1140±40	2880±60	1970±60
Накопление за 8 лет		1800	830
Накопление за год		222	104

Таким образом, в условиях Приобья на агросерой почве внесение азотных удобрений в дозах N₃₀, N₆₀, N₉₀, N₁₂₀ не влияло на урожайность *M. sacchariflorus* сорта Сорановский. На наш взгляд, этот результат оказался достаточно ожидаемым. В предыдущей работе (31) мы подробно описали особенности круговорота биофильных элементов в посадках мискантуса в условиях Приобья. В частности, было установлено, что по мере формирования плантации в подземной части накапливается около 130 кг/га азота, которого было достаточно для обеспечения фитомассы, формирующейся в годовом цикле. Кроме того, согласно данным литературы (6), в ризосфере мискантуса может формироваться активный комплекс азотфиксирующих микроорганизмов, который в состоянии обеспечить значительную долю в выносе элемента культурой.

Нами получены новые для территории России данные о фитопатогенах мискантуса, активность которых повышалась при применении азотных удобрений. Было показано, что фузариозная гниль может снизить качество товарной продукции корневищ в 2 раза при внесении азотных удобрений по сравнению с контролем. О вредоносности для мискантуса грибных инфекций, в частности рода *Fusarium*, сообщалось в ряде публикаций для условий Европы (21, 43). По мере расширения мировых площадей и возраста плантаций актуальность проблемы защиты мискантуса от болезней повышается. В последние годы ведется разработка новых биопрепаратов для этих целей. В частности, для условий Новой Зеландии показана эффективность препаратов на основе грибов рода *Trichoderma* для снижения пораженности корневищ грибами *Rhizoctonia solani* (44).

Специалисты возлагают большие надежды на культивирование мискантуса как один из способов решения проблемы углеродной нейтральности. В предыдущей работе мы показали наличие объективных предпосылок для достижения этой цели (31). По нашим ориентировочным оценкам, накопление мобильного ПОВ составило 150-200 кг С/га в год. С увеличением возраста плантации указанная величина практически не менялась. При этом темпы накопления общего углерода (С_{орг.}) в почве составляли примерно 0,06 абс.% в год.

В период достижения зрелости плантации надземная фитомасса мискантуса составляла не менее 12 т/га, подземная — 18 т/га сухого вещества. Согласно официальным данным, средняя урожайность традиционных многолетних трав в России составляет 1,39-1,79 т/га (45). Следовательно, продуктивность надземной фитомассы мискантуса превышает показатели для многолетних трав почти в 10 раз. При этом отношение фитомассы корней к фитомассе надземной части для мискантуса составила 0,8-1,4 против показателей для трав 6-14 (46). Иными словами, колоссальная продуктивность мискантуса формируется в основном за счет надземной части, что отличает его от традиционной травяной растительности. Следовательно, поступление органического вещества в почву с подземной фитомассой мискантуса не пропорционально величине надземной фитомассы.

Для сравнения величин накопления С_{орг.} в почве под мискантусом и травами рассмотрим соответствующие данные литературы для условий Красноярского края, где по результатам обследования почв 13 залежей возрастом от 5 до 20 лет средняя величина накопления С_{орг.} составила 0,072 % в год (47). Следовательно, интенсивность накопления С_{орг.} под мискантусом в нашем опыте не превышала показатели для трав при формировании залежей. То есть возможность повышения содержания общего органического углерода за счет культивирования мискантуса весьма ограничена и не превышает соответствующие показатели для обычных многолетних трав. Причину авторы связывают с особенностями минерализации опада мискантуса (27, 29). В нашем опыте внесение азотных удобрений не отразилось на содержании общего углерода в почве.

Другая ситуация складывалась с мобильным органическим веществом в почве. Внесение азотного удобрения в наших условиях приводило к снижению темпов накопления этих фракций ПОВ примерно на 50 % в сравнении с контролем без удобрений. Это, очевидно, было связано с более быстрой минерализацией поступающего опада из-за снижения отношения С:N в вариантах с внесением удобрений. Активизацию минерализационных процессов на фоне удобрений нам удалось показать на примере нитрификации. При максимальной дозе N₁₂₀ превышение показателя на удобренном фоне достигало 30-кратного.

Полученные данные еще раз подтверждают базовый вывод относительно органического вещества почвы: при воздействии экономически обоснованных агротехнологий содержание общего углерода в почве (C_{орг.}) остается относительно стабильным за счет динамики его мобильных фракций (41, 48).

Итак, в гидротермических условиях вегетационного периода, характерных для Приобья, внесение азотных удобрений в дозах от N₃₀ до N₁₂₀ не оказало влияния на урожайность фитомассы *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский, но сопровождалось процессами, негативно влияющими как на качество продукции, так и на секвестрацию углерода в агроценозе. Удобрения способствовали повышению доли листьев в биомассе культуры, приводили к увеличению пораженности корневищ фузариозной инфекцией почти в 2 раза по сравнению с контролем без удобрений, снижали накопление углерода в почве. Величина накопления C_{орг.} в почве под многолетней (8 лет) плантацией мискантуса не превышала соответствующие показатели, наблюдаемые при произрастании традиционных многолетних трав, и составила в среднем 0,06 абс.% в год. Внесение удобрений не влияло на содержание C_{орг.}, тогда как запас мобильного органического вещества на фоне N₁₂₀ была на 50 % ниже в сравнении с фоном без удобрений. Следовательно, в условиях Приобья применение азотных удобрений под посадками *M. sacchariflorus* сорта Сорановский, независимо от дозы, оказалось нецелесообразным.

Авторы выражают искреннюю благодарность к.с.-х.н., в.н.с. лаборатории генофонда растений СибНИИРС — филиала ИЦиГ СО РАН Е.А. Орловой за предоставленные данные по оценке пораженности корневищ фитопатогенами.

¹Сибирский НИИ растениеводства и селекции — филиал ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения РАН, 630501 Россия, Новосибирская обл., р.п. Краснообск, ул. С-100, зд. 21, а/я 375, e-mail: kapustyanchik@bionet.nsc.ru ✉;

²ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, 633501 Россия, Новосибирская обл., р.п. Краснообск, ул. Центральная, e-mail: Danilova7alb@yandex.ru

Поступила в редакцию 17 апреля 2024 года
Принята к публикации 18 июня 2024 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2025, V. 60, № 1, pp. 125-137

CULTIVATION OF *Miscanthus sacchariflorus* IN SIBERIA: APPLICATION OF NITROGEN FERTILIZERS

S.Yu. Kapustyanchik¹ ✉, A.A. Danilova^{1, 2}

¹Siberian Research Institute of Plant Cultivation and Breeding — Branch of Institute of Cytology and Genetics, SB RAS, 21, ul. C-100, Krasnoobsk, Novosibirsk Province, Russia 630501, e-mail kapustyanchik@bionet.nsc.ru (✉ corresponding author);

²Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technologies RAS, ul. Tsentralnaya, Krasnoobsk, Novosibirsk Province, 633501 Russia, e-mail Danilova7alb@yandex.ru

ORCID:

Kapustyanchik S.Yu. orcid.org/0000-0002-2954-0620 Danilova A.A. orcid.org/0000-0002-2212-3074

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

The authors express their sincere gratitude to E.A. Orlova, Ph.D. (Agriculture), Leading Researcher of the Laboratory of Plant Gene Pool SibNIISR — branch of the ICG SB RAS for the provided data on the assessment of rhizome infestation by phytopathogens.

Supported by the budget project of the ICG SB RAS No. FWNR-2022-0018

Final revision received April 17, 2024

doi: 10.15389/agrobiol.2025.1.125eng

Accepted June 18, 2024

Abstract

Perennial energy plants, including *Miscanthus* spp., are cultivated on an industrial scale for

bioenergy production and technological purposes. It has been established that high crop productivity is possible even at low costs. In Russia, the problem of growing *Miscanthus* for biomass production is poorly understood, and the features of fertilizer application for this crop have been practically unstudied. *Miscanthus* is a new crop for Siberia. The problem of fertilizer application under *Miscanthus* plantings remains insufficiently studied due to the diversity of climatic and soil conditions, as well as species characteristics of the crop. At the same time, the majority of publications are devoted to the species *M. giganteus*, which differs from the species *M. sacchariflorus* in the structure of the root system. The paper presents long-term experimental data on a set of problems associated with the use of nitrogen fertilizers for the *Miscanthus* crop in Siberian conditions. It has been established that nitrogen fertilizers, without affecting the yield, lead to a decrease in the quality of raw materials due to an increase in the proportion of leaves in the phytomass and an increase in the infestation of rhizomes with fusarium infection; in addition, a decrease in the accumulation of organic matter in the soil is noted when nitrogen fertilizers are applied. The aim of this work is to determine the feasibility of using nitrogen fertilizers under perennial plantings of *Miscanthus* cultivated in the continental conditions of Siberia: to assess the effect of fertilizers on crop yield, plant infestation by phytopathogens, and the dynamics of organic matter in the soil. The studies were conducted on the territory of the experimental station of the SibNIISR — a branch of the Institute of Cytology and Genetics SB RAS (Novosibirsk Province, Central Forest-steppe of the Novosibirsk Ob Region). The effect of nitrogen fertilizer on the size and structure of the *Miscanthus sacchariflorus* Soranovsky variety yield was assessed in the initial period of plantation formation (2016–2017) and during its maturity (2018–2022). The plantation with a total area of 0.3 ha consisted of 4 blocks, each of which included fertilizer options N₀, N₃₀, N₆₀, N₉₀, N₁₂₀ in 4-fold repetition. P₆₀K₃₀ was added to all plots. Nitrogen fertilizers in the form of ammonium nitrate were added annually in spring. *M. sacchariflorus* rhizomes were used as planting material. Aboveground phytomass was harvested from 0.25 m² plots. Underground phytomass was recorded using the monolith method at the stage of drying of aboveground part of plants. The washed rhizomes were visually assessed for the degree of fungal infestation using standard and modified scales. Total carbon accumulation (C_{Org}) was estimated by comparing the soil under fallow (the original soil on which miscanthus was planted) and under an 8-year-old miscanthus plantation (2023). The amount of carbon accumulated in the mobile fraction of soil organic matter (SOM) during the period of *Miscanthus* growth was determined by comparing the C-CO₂ production by soil samples collected under perennial miscanthus plantings and annual fallow. The intensity of nitrate nitrogen accumulation in the soil was determined in a laboratory experiment under optimal hydrothermal conditions using the generally accepted Kravkov method. Over a 6–7-year period of planting *M. sacchariflorus* variety Soranovsky, the aboveground phytomass reserve reached an average of 12.0 t/ha, underground — 18.0 t/ha. These indicators are close to the average, typical for this species in the world. Nitrogen fertilizer did not affect the accumulation of phytomass, but contributed to the change in its structural elements. During the period of plantation formation under the influence of nitrogen fertilizer, a decrease in the length of the generative shoot by an average 5 %, the number and biomass of panicles by 35 %, an increase in foliage by 9 % were observed compared to the variant without fertilizers. During the maturity period of the plantation, deviations of the parameters from the unfertilized control became more pronounced, especially at fertilizer doses above N₆₀. In the treatments with the application of nitrogen fertilizers, there was an increase in the incidence of rhizomes with fungal infection (15.5 vs 7.7 % without fertilizers). The main pathogens were fungi of the genus *Fusarium* — *F. oxysporum* and *F. graminearum*. Over 8 years, 150–200 kg C/ha of the mobile fraction of SOM and about 0.05 % of total carbon accumulated annually in the soil under the *Miscanthus* plantation, which corresponds to the parameters typical of traditional perennial grasses. The rate of carbon accumulation in the soil did not increase with the age of the plantation. The application of N₁₂₀ resulted in a decrease in the amount of mobile SOM accumulation by approximately 50 % compared to the variant without fertilizers (104 versus 220 kg C/ha per year). In autumn, during the period of drying of aboveground phytomass, the content of mineral nitrogen in the soil was low in all experimental variants. At the same time, the mineralization potential of the soil increased as the nitrogen dose increased. Thus, nitrogen fertilizers did not increase the yield of *M. sacchariflorus* when grown on the Grey-Luvic Phaeozem soil of the Ob region, increased the incidence of fusarium rot in rhizomes, and reduced the rate of organic matter accumulation in the soil. Therefore, in the conditions of the Central forest-steppe of the Novosibirsk Ob region, it is not advisable to use nitrogen fertilizers in cultivation of *M. sacchariflorus* variety Soranovsky.

Keywords: bioenergy crops, *Miscanthus sacchariflorus*, cv. Soranovsky, aboveground phytomass, nitrogen fertilizers, Fusarium fungi, soil carbon accumulation.

REFERENCES

1. Shield I.F., Barraclough T.J.P., Riche A.B., Yates N.E. The yield and quality response of the energy grass *Miscanthus × giganteus* to fertiliser applications of nitrogen, potassium and sulphur. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 68: 185–194 (doi: 10.1016/j.biombioe.2014.06.007).
2. Dubis B., Bułkowska K., Lewandowska M., Szempliński W., Jankowski K.J., Idzkowski J., Kordala N., Szymańska K. Effect of different nitrogen fertilizer treatments on the conversion of

- Miscanthus* × *giganteus* to ethanol. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 731-737 (doi: 10.1016/j.biortech.2017.07.005).
3. Gołab-Bogacz I., Helios W., Kotecki A., Kozak M., Jama-Rodzeńska A. Content and uptake of ash and selected nutrients (K, Ca, S) with biomass of *Miscanthus* × *giganteus* depending on nitrogen fertilization. *Agriculture*, 2021, 11(1): 76 (doi: 10.3390/agriculture11010076).
 4. Chen H., Dai Z., Jager H.I., Wullschleger S.D., Xu J., Schadt Ch.W. Influences of nitrogen fertilization and climate regime on the above-ground biomass yields of miscanthus and switchgrass: a meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 108: 303-311 (doi: 10.1016/j.rser.2019.03.037).
 5. Miguez F.E., Villamil M.B., Long S.P., Bollero G.A. Meta-analysis of the effects of management factors on *Miscanthus* × *giganteus* growth and biomass production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(8-9): 1280-1292 (doi: 10.1016/j.agrformet.2008.03.010).
 6. Monti A., Zegada-Lizarazu W., Zanetti F., Casler M. Chapter Two — Nitrogen fertilization management of switchgrass, miscanthus and giant reed: a review. *Advances in Agronomy*, 2019, 153: 87-119 (doi: 10.1016/bs.agron.2018.08.001).
 7. Crutzen P.J., Mosier A.R., Smith K.A., Winiwarter W. N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(2): 389-395 (doi: 10.5194/acp-8-389-2008).
 8. Hu B., Jarosch A.-M., Gauder M., Graeff-Hönninger S., Schnitzler J.-P., Grote R., Rennenberg H., Kreuzwieser J. VOC emissions and carbon balance of two bioenergy plantations in response to nitrogen fertilization: a comparison of *Miscanthus* and *Salix*. *Environmental Pollution*, 2018, 237: 205-217 (doi: 10.1016/j.envpol.2018.02.034).
 9. Himken M., Lammel J., Neukirchen D., Czapionka-Krause U., Olf H.-W. Cultivation of *Miscanthus* under West European conditions: seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization. *Plant Soil*, 1997, 189: 117-126 (doi: 10.1023/A:1004244614537).
 10. Christian D.G., Riche A.B., Yates N.E. Growth, yield and mineral content of *Miscanthus* × *giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests. *Industrial Crops and Products*, 2008, 28(3): 320-327 (doi: 10.1016/j.indcrop.2008.02.009).
 11. Dohleman F.G., Heaton E.A., Arundale R.A., Long S.P. Seasonal dynamics of above- and below-ground biomass and nitrogen partitioning in *Miscanthus* × *giganteus* and *Panicum virgatum* across three growing seasons. *Global Change Biology Bioenergy*, 2012, 4(5): 534-544 (doi: 10.1111/j.1757-1707.2011.01153.x).
 12. Studt J.E., McDaniel M.D., Tejera M.D., VanLoocke A., Howe A., Heaton E.A. Soil net nitrogen mineralization and leaching under *Miscanthus* × *giganteus* and *Zea mays*. *Global Change Biology Bioenergy*, 2021, 13(9): 1545-1560 (doi: 10.1111/gcbb.12875).
 13. Heaton E.A., Dohleman F.G., Miguez A.F., Juvik J.A., Lozovaya V., Widholm J., Zabolina O.A., McIsaac G.F., David M.B., Voigt T.B., Boersma N.N., Long S.P. Chapter 3 — *Miscanthus*: a promising biomass crop. In: *Advances in botanical research*, vol. 56. J.-C. Kader, M. Delseny (eds.). Academic Press, 2010, 56: 75-137 (doi: 10.1016/B978-0-12-381518-7.00003-0).
 14. Jørgensen U. Benefits versus risks of growing biofuel crops: the case of *Miscanthus*. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2011, 3(1-2): 24-30 (doi: 10.1016/j.cosust.2010.12.003).
 15. Anderson E., Arundale R., Maughan M., Oladeinde A., Wycislo A., Voigt T. Growth and agronomy of *Miscanthus* × *giganteus* biomass production. *Biofuels*, 2011, 2(1): 71-87 (doi: 10.4155/bfs.10.80).
 16. Huggett D.A.J., Leather S.R., Walters K.F.A. Suitability of the biomass crop *Miscanthus sinensis* as a host for the aphids *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Rhopalosiphum maidis* (F.), and its susceptibility to the plant luteovirus Barley Yellow Dwarf Virus. *Agricultural and Forest Entomology*, 2001, 1(2): 143-149 (doi: 10.1046/j.1461-9563.1999.00019.x).
 17. Lamphey J.N.L., Plumb R.T., Shaw M.W. Interactions between the grasses *Phalaris arundinacea*, *Miscanthus sinensis* and *Echinochloa crus-galli*, and Barley and Cereal Yellow Dwarf Viruses. *Journal of Phytopathology*, 2003, 151(7-8): 463-468 (doi: 10.1046/j.1439-0434.2003.00752.x).
 18. O'Neill N.R., Farr D.F. *Miscanthus* blight, a new foliar disease of ornamental grasses and sugarcane incited by *Leptosphaeria* sp. and its anamorphic state *Stagonospora* sp. *Plant Disease*, 1996, 80(9): 980-987.
 19. Grisham M.P., Maroon-Lango C.J., Hale A.L. First report of Sorghum mosaic virus causing mosaic in *Miscanthus sinensis*. *Plant Disease*, 2012, 96(1): 150 (doi: 10.1094/PDIS-07-11-0617).
 20. Agindotan B., Okanu N., Oladeinde A., Voigt T., Long S., Gray M., Bradley C. Detection of Switchgrass mosaic virus in *Miscanthus* and other grasses. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2013, 35(1): 81-86 (doi: 10.1080/07060661.2012.752763).
 21. Thinggaard K. Study of the role of *Fusarium* in the field establishment problem of *Miscanthus*. *Acta Agriculturae Scandinavica B-SP*, 2008, 47(4): 238-241 (doi: 10.1080/09064719709362466).
 22. Sun Y., Wang M., Mur L.A.J., Shen Q., Guo S. Unravelling the roles of nitrogen nutrition in plant disease defences. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(2): 572 (doi: 10.3390/ijms21020572).
 23. Maywald N.J., Mang M., Pahls N., Neumann G., Ludewig U., Francioli D. Ammonium fertilization increases the susceptibility to fungal leaf and root pathogens in winter wheat. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 946584 (doi: 10.3389/fpls.2022.946584).

24. Shepherd A., Littleton E., Clifton-Brown J., Martin M., Hastings A. Projections of global and UK bioenergy potential from *Miscanthus × giganteus* — Feedstock yield, carbon cycling and electricity generation in the 21st century. *Global Change Biology Bioenergy*, 2020, 12(4): 287–305 (doi: 10.1111/gcbb.12671).
25. Souki K.S.A., Burdová H., Trubač J., Štojd J., Kurán P., Kříženecká S., Machová I., Kubát K., Popelka J., Malinská H.A., Nebeská D., Ust'ak S., Honzik R., Trögl J. Enhanced carbon sequestration in marginal land upon shift towards perennial C₄ *Miscanthus × giganteus*: a case study in North-Western Czechia. *Agronomy*, 2021, 11(2): 293 (doi: 10.3390/agronomy11020293).
26. Robertson A.D., Whitaker J., Morrison R., Davies C.A., Smith P., McNamara N.P. A *Miscanthus* plantation can be carbon neutral without increasing soil carbon stocks. *Global Change Biology Bioenergy*, 2017, 9(3): 645–661 (doi: 10.1111/gcbb.12397).
27. Zang H., Blagodatskaya E., Wen Y., Xu X., Dyckmans J., Kuzyakov Y. Carbon sequestration and turnover in soil under the energy crop *Miscanthus*: repeated ¹³C natural abundance approach and literature synthesis. *Global Change Biology Bioenergy*, 2018, 10(4): 262–271 (doi: 10.1111/gcbb.12485).
28. Rehbein K., Sandhage-Hofmann A., Amelung W. Soil carbon accrual in particle-size fractions under *Miscanthus x. giganteus* cultivation. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 78: 80–91 (doi: 10.1016/j.biombioe.2015.04.006).
29. Ye S., Hall S.J. Mechanisms underlying limited soil carbon gains in perennial and cover-cropped bioenergy systems revealed by stable isotopes. *Global Change Biology Bioenergy*, 2020, 12(1): 101–117 (doi: 10.1111/gcbb.12657).
30. Dufossé K., Drewer J., Gabriell B., Drouet 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, 69: 198–210 (doi: 10.1016/j.biombioe.2014.07.003).
31. Kapustyanichik S.Yu., Danilova A.A., Likhenko I.E. *Miscanthus sacchariflorus* in Siberia — biological yield parameters and dynamics of biofilic elements. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2021, 56(1): 121–134 (doi: 10.15389/agrobiology.2021.1.121rus).
32. Sharkov I.N., Samokhvalova L.M., Mishina P.V., Shepelev A.G. *Pochvovedenie*, 2014, 4: 473–479 (doi: 10.7868/s0032180x1404008x) (in Russ.).
33. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils of Russia]*. Smolensk, 2004 (in Russ.).
34. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)*. 5-e izdanie, dopolnennoe i pererabotannoe [Methods of field trials]. Moscow, 1985 (in Russ.).
35. Shevkun A.G. *Mikoznye gnili piona travyanistogo, diagnostika, sortovaya ustoychivost' i mery bor'by. Kandidatskaya dissertatsiya [Mycotic rots of herbaceous peony, diagnostics, varietal resistance and control measures. PhD Thesis]*. Moscow, 2011 (in Russ.).
36. *Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur*. Vypusk 1. [Methodology of state testing of agricultural crops. Vol. 1]. Moscow, 2019 (in Russ.).
37. *Metody opredeleniya bolezney i vreditel'nykh sel'skokhozyaystvennykh rasteniy [Methods for identifying diseases and pests of agricultural plants]*. Moscow, 1987 (in Russ.).
38. Bilay V.I. *Fuzarii (biologiya i sistematika) [Fusaria (biology and taxonomy)]*. Kiev, 1977 (in Russ.).
39. Shipilova N.P., Ivashchenko V.G. *Sistematika i diagnostika gribov roda Fusarium na zernovykh kul'turakh [Taxonomy and diagnostics of fungi of the genus Fusarium on cereal crops]*. St. Petersburg, 2008 (in Russ.).
40. Gagkaeva T.Yu. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2009, 43(4): 331–342 (in Russ.).
41. Sharkov I.N. *Pochvovedenie*, 1984, 7: 136–143 (in Russ.).
42. *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochvy [Pod redaktsiyey A.V. Sokolova [Agrochemical methods of soil research. A.V. Sokolov (ed.)]*. Moscow, 1975 (in Russ.).
43. Covarelli L., Beccari G., Tosi L. *Miscanthus* rhizome rot: a potential threat for the establishment and the development of biomass cultivations. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 46: 263–269 (doi: 10.1016/j.biombioe.2012.08.018).
44. Kandula D.R.W., Jones E., Stewart A., McLean K.L., Hampton J. *Trichoderma* species for biocontrol of soil-borne plant pathogens of pasture species. *Biocontrol Science and Technology*, 2015, 25(9): 1052–1069 (doi: 10.1080/09583157.2015.1028892).
45. *Urozhaynost' kormovykh kul'tur i trav, 2001–2018 [Forage crop and grass yield, 2001–2018]*. Available: <https://rosng.ru/post/urozhaynost-kormovyh-kultur-i-trav-2001-2018>. No date.
46. Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Shmakova E.I., Snytko V.A., Dubynina S.S., Magomedova L.N., Nefed'eva L.G., Semenyuk N.V., Tishkov A.A., Ti T., Khakimzyanova F.I., Shatokhina N.G., Kyrgys Ch.O., Sambuu A.D. *Biologicheskaya produktivnost' travyanykh ekosistem. Geograficheskie zakonomernosti i ekologicheskie osobennosti*. 2-e izdanie, ispravlennoe i dopolnennoe [Biological productivity of grassland ecosystems. Geographical patterns and ecological features. 2nd Edition, Revised and Supplemented]. Novosibirsk, 2018 (in Russ.).
47. Shpedt A.A., Vergeyichik P.V. *Vestnik Altayskogo GAU*, 2014, 6: 48–52 (in Russ.).
48. Kiryushin V.I., Ganzhara N.F., Kaurichev I.S., Orlov D.S., Titlyanova A.A., Fokin A.D. *Kontseptsiya optimizatsii rezhima organicheskogo veshchestva pochv v agrolandshaftakh [Concept of optimization of the organic matter regime of soils in agricultural landscapes]*. Moscow, 1993 (in Russ.).