







doi 10.18699/vjgb-25-24

## Морфологическая изменчивость и генетическая структура *Miscanthus sinensis* (Poaceae), культивируемого в лесостепи Западной Сибири

О.В. Дорогина <sup>1,2</sup> , И.Н. Кубан <sup>1</sup>, Г.А. Зуева <sup>1</sup>, Е.В. Жмудь <sup>1</sup>, О.Ю. Васильева <sup>1</sup><sup>1</sup> Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия olga-dorogina@yandex.ru







**Аннотация.** *Miscanthus sinensis* Andersson (Poaceae), как и все другие виды рода *Miscanthus*, является растением муссонного климата, поэтому в суровых условиях лесостепи Западной Сибири не успевает сформировать жизнеспособные семена. При изучении большого числа образцов этого вида из коллекционного генофонда Центрального сибирского ботанического сада СО РАН, привезенных из различных районов Приморского края, впервые удалось отобрать две формы, S1 и S2 (selected), образующие в местных условиях в течение короткого вегетационного периода качественные зрелые семена, из которых были получены первое и второе, G1 и G2 (generation), репродуктивные поколения. Цель настоящего исследования – отбор, биоморфологическая характеристика раноцветущих декоративных форм *M. sinensis* и анализ генетического полиморфизма отобранных форм (S1, S2) и полученных поколений (G1, G2) с помощью маркеров ISSR. В условиях интродукции отобранные образцы *M. sinensis* характеризовались комплексной устойчивостью к болезням и вредителям, высокой декоративностью, ранними сроками цветения и образованием полноценных семян. При изучении генетического полиморфизма с помощью маркеров ISSR у родительских образцов S1 и S2 обнаружено от одного до трех уникальных ПЦР-фрагментов. Исследование генетической изменчивости в поколении G1 показало полное единообразие генотипов. В поколении G2 наблюдалась изменчивость, при этом нами найдено пять вариантов генотипов. В результате выявлены уникальные полиморфные фрагменты, длина которых варьировала от 300 до 3000 п. н.; с их помощью составлена генетическая формула для паспортизации отобранных нами форм *M. sinensis*. Эти формы характеризуются высокими репродуктивными способностями в условиях континентального климата, перспективны для селекции, а, благодаря своим биоморфологическим особенностям, – и для ландшафтного дизайна.

**Ключевые слова:** качество семян; декоративная форма *Miscanthus sinensis*; ISSR-маркеры; отобранные формы S1 и S2; репродуктивные поколения G1 и G2; паспортизация

**Для цитирования:** Дорогина О.В., Кубан И.Н., Зуева Г.А., Жмудь Е.В., Васильева О.Ю. Морфологическая изменчивость и генетическая структура *Miscanthus sinensis* (Poaceae), культивируемого в лесостепи Западной Сибири. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2025;29(2):210-218. doi 10.18699/vjgb-25-24

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Центрального сибирского ботанического сада СО РАН «Анализ биоразнообразия, сохранение и восстановление редких и ресурсных видов растений с использованием экспериментальных методов» (№ АААА-А21-121011290025-2), а также при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSUS-2024-0024.

## Morphological variability and genetic structure of *Miscanthus sinensis* (Poaceae) cultivated in the forest-steppe of Western Siberia

О.В. Dorogina <sup>1,2</sup> , I.N. Kuban <sup>1</sup>, G.A. Zueva <sup>1</sup>, E.V. Zhmud <sup>1</sup>, O.Yu. Vasilyeva <sup>1</sup><sup>1</sup> Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia olga-dorogina@yandex.ru

**Abstract.** *Miscanthus sinensis* Andersson (Poaceae) grows in monsoon climate. For this reason, when cultured under the conditions of a short growing season of Western Siberia, full-fledged seeds do not have time to form. We have studied a large number of specimens of this species from Primorsky Krai in the collection of the Central Siberian Botanical Garden, SB RAS. Using these samples, it was possible for the first time to select forms that produce high-quality mature seeds in local conditions during a short growing season, possibly due to spontaneous hybridization of early

flowering forms. We obtained the first and second (G1 and G2) generations from these seeds and checked for hybrids. The aim of this study is selection, biomorphological characterization of early flowering ornamental forms of *M. sinensis* and analysis of genetic polymorphism of the selected forms (S1, S2) and the obtained G1 and G2 generations using ISSR markers. Under the conditions of introduction, the selected samples of *M. sinensis* were characterized by complex resistance, high decorativeness, reached the ontogenetic state of mature generative plants and differed from other samples in the collection by early flowering and the formation of full-fledged seeds. Thus, the forms of *M. sinensis* we selected are promising for landscape design and breeding. When studying the genetic structure of G1, G2 and two generations of the sample using ISSR markers, three effective stable unique PCR fragments were identified. A study of the genetic variability of the resulting G1 generation showed complete uniformity of genotypes. In the G2 generation, variability was observed, and we found five sets of genotypes, which were also confirmed in the dendrogram. As a result, unique molecular polymorphic fragments were identified. Their length was 300–3000 bp, and the genetic formula for certification of *M. sinensis* was compiled.

**Key words:** quality of seeds; decorative form of *Miscanthus sinensis*; ISSR markers; S1 and S2 selected forms; G1 and G2 generations; certification

**For citation:** Dorogina O.V., Kuban I.N., Zueva G.A., Zhmud E.V., Vasilyeva O.Yu. Morphological variability and genetic structure of *Miscanthus sinensis* (Poaceae) cultivated in the forest-steppe of Western Siberia. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed.* 2025;29(2):210-218. doi 10.18699/vjgb-25-24

## Введение

Род *Miscanthus* Andersson (веерник) относится к подтрибе Saccharinae (триба Andropogoneae, семейство Poaceae). Веерники – многолетние травянистые растения, характеризующиеся C4-типом фотосинтеза, высокой продуктивностью биомассы и относительной неприхотливостью, что позволяет рассматривать их в качестве перспективной биоэнергетической культуры (Nie et al., 2014). Вопросы биологии и продукционного процесса разных видов рода *Miscanthus* все чаще освещаются в современных работах российских (Гущина и др., 2018; Дорогина и др., 2018, 2022; Берсенева и др., 2020; Капустянчик и др., 2020; Анисимов и др., 2021; Якименко и др., 2021) и зарубежных (Chae et al., 2014; Gifford et al., 2014) исследователей. В них *M. sacchariflorus* (Maxim.) Hack., *M. sinensis* Andersson, и особенно *Miscanthus × giganteus* J.M. Greef, Deuter ex Hodk., Renvoize, рассматриваются в качестве источников биоэтанола и биоцеллюлозы. В настоящее время в лесостепи Западной Сибири выращивается сорт Сорановский, полученный путем отбора из природного материала *M. sacchariflorus* и представляющий собой ценную техническую культуру (Поцелуев, Капустянчик, 2018).

*M. sinensis* и *M. purpurascens* Andersson широко используются как декоративные злаки и уже представлены набором сортов, в том числе пестролистных. Наиболее популярен *M. sinensis*, который применяют для оформления берегов водоемов, в каменистых садах, рокариях, миксбордерах в качестве солитеров на газоне и для создания декоративных групповых посадок (Гречушкина-Сухорукова, 2022). В естественных условиях *M. sinensis* и *M. purpurascens* произрастают в регионах с муссонным климатом. Тем не менее, как показали многолетние исследования ритмов роста и развития, биоморфологии и онтогенеза, оба вида могут успешно выращиваться в условиях континентального климата, но *M. sinensis* имеет более высокий адаптивный потенциал (Дорогина и др., 2018). Считается, что в суровых условиях лесостепи Западной Сибири все виды мискантусов (веерников) не успевают сформировать полноценные семена (Зуева, 2020).

Коллекционный генофонд Центрального сибирского ботанического сада СО РАН (ЦСБС) постоянно пополняется новыми формами, сортами мискантуса из различных

мест обитания. При пополнении коллекции образцами из разных районов Приморья нами отобраны формы S1 и S2 (selected) *M. sinensis*, характеризующиеся в условиях континентального климата лесостепного Приобья формированием жизнеспособных семян, из которых было получено два поколения, G1 и G2 (generation). Эти формы также характеризовались ускоренными темпами сезонного развития и более компактным габитусом – образуют меньше вегетативной массы и раньше начинают формировать генеративные органы.

Цель настоящего исследования – отбор, биоморфологическая характеристика раноцветущих декоративных форм *M. sinensis* и анализ генетического полиморфизма отобранных форм S1 и S2 и полученных поколений G1 и G2 с помощью маркеров ISSR.

## Материалы и методы

Семена *M. sinensis* были собраны в 2017 г. в ценопопуляции, произрастающей на п-ове Гамова Хасанского района Приморского края (42°58'02"N, 131°20'67"E), и посеяны на коллекционном участке декоративных растений ЦСБС СО РАН. В условиях лесостепи Западной Сибири (54°82'15"N, 83°10'46"E) обнаружено только два растения, у которых сформировались семена. Семена завязались на тех побегах, которые раньше всех прошли фазу цветения (с пяти побегов было собрано более 100 шт.). Эти отобранные адаптированные к местным климатическим условиям растения использовались в качестве исходных форм (S1 и S2) для получения последующих поколений G1 и G2.

Опыты закладывались в двух вариантах: в лабораторных условиях в чашках Петри и при посеве в почву в теплице. Динамику прорастания полученных семян, выявление наличия периода покоя, влияние факторов среды на их прорастание оценивали согласно лабораторно-теплично-грунтовому методу выращивания (Дюрягина, 1982). Как показали дальнейшие исследования, семена изучаемых видов мискантуса находились в состоянии не глубокого, а вынужденного покоя.

Вариант I. Семена *M. sinensis* закладывали для прорастания в лабораторных условиях при комнатной температуре (19–20 °C) в третьей декаде февраля в чашки

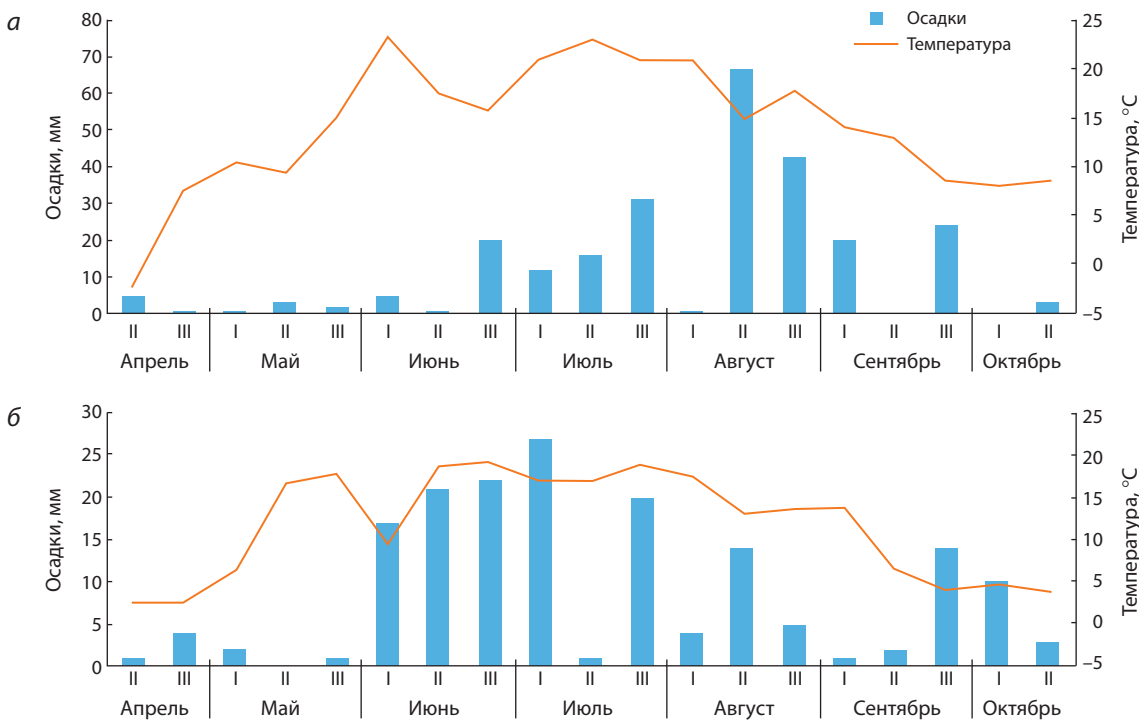


Рис. 1. Гидротермические условия вегетационного периода 2022 г. (а) и 2023 г. (б).

Петри в 2–3 повторностях, по 50 семян в каждой, на фильтровальную бумагу. Небольшое количество повторностей обусловлено тем, что при наличии незначительного урожая семян мы, разделяя его на повторности, старались следовать ГОСТам (Методы определения..., 1973). Освещение естественное, в качестве увлажнителя использована отфильтрованная водопроводная вода. Регулярные наблюдения проводили за состоянием семян, динамикой прорастания, характером роста первичного корня и первичного побега (первичного листа).

Вариант II. Семена *M. sinensis* высевали в стационарную теплицу зимой во второй декаде января в контейнеры с размером ячеек 2 × 2 см, заполненных почвенной смесью из плодородной земли, перегноя и песка. В небольшое углубление в почве (не более 1 см) помещали по три семени. Их слегка придавливали и осторожно увлажняли опрыскиванием, накрывали стеклом или пленкой, не заделывая в почву. Учет энергии прорастания и всхожести проводили на 7-е и 21-е сутки соответственно.

Гидротермические условия периодов вегетации рассчитывали по данным ближайшей к ЦСБС метеостанции «Огурцово». Вегетационные периоды в 2022 г. и, особенно, в 2023 г. характеризовались благоприятными метеос условиями для цветения и плодоношения *M. sinensis*, сходными по своей динамике с гидротермическими показателями естественных мест произрастания этого вида. В 2022 г. со второй декады июня и с первой декады июля складывались благоприятные гидротермические условия для роста и развития растений. Среднемесячная температура воздуха в июне и июле составила 17.3 и 18.9 °С соответственно (рис. 1, а). В 2023 г. засушливый период весной и в первой половине лета сменился обильным выпадением осадков в августе (см. рис. 1, б).

Метелки срезали для сбора семян в сухую погоду, после 10 октября (исходя из даты сбора (созревания) цветение данной особи должно было наступить в середине августа, а не в конце июля–начале августа).

Поскольку виды и формы вереников изучаются в коллекции (в соответствии с основной тематикой) в качестве декоративных злаков, выполняли следующие измерения и подсчеты: длина побега (см), длина метелки (см), число листьев на побеге (шт.).

Для изучения генетической изменчивости мы применяли метод электрофореза межмикросателлитных участков геномной ДНК (ISSR-анализ), так как известно, что он наиболее удобен, чувствителен и воспроизводим среди анонимных методов фрагментного анализа (Nei et al., 1979; Кашин и др., 2016). ДНК из высушенных в лабораторных условиях листьев *M. sinensis* выделяли методом СТАВ (Doyle J.J., Doyle J.L., 1987).

Для изучения изменчивости между исходными формами и двумя поколениями использовали ISSR-праймеры, апробированные нами для *M. sacchariflorus* (Poaceae) (Дорогина и др., 2018). В этой работе нами взято три наиболее информативных праймера, 17899А, 17898В, UBS-857, характеризовавшихся полиморфным и воспроизводимым паттерном (Дорогина и др., 2019, 2022).

Полимеразную цепную реакцию проводили на амплификаторе С1000 (Bio-Rad, США). Объем реакционной смеси был 25 мкл. В ее составе использованы следующие компоненты: 1.5 ед. Таq ДНК-полимеразы («Медиген», Россия); 2.7 mM MgCl<sub>2</sub>, 0.8 mM ISSR-праймера («Медиген»); 2 мкл раствора ДНК; 2 мкл воды mQ H<sub>2</sub>O. Амплификация состояла из нескольких этапов: денатурация ДНК в течение 90 с при 94 °С и 35 циклов, каждый из которых включал 40 с при 94 °С, 45 с – отжи праймера и

90 с – при 42–56 °С. Продолжительность заключительного этапа пролонгирования нуклеотидной цепи составила 5 мин при 72 °С.

Электрофоретическое разделение продуктов амплификации выполняли в 1.5 % агарозном геле в 1x TAE-буфере при напряжении 4 В/см. Для статистической обработки данных задействованы пакеты программ TREECON (Van de Peer, De Wachter, 1997). Каждый ISSR-маркер рассматривался как доминантный, генетические дистанции и уровень полиморфизма (P, %) каждого праймера рассчитывали по M. Nei, W.H. Li (1979).

Молекулярно-генетические формулы для паспортизации популяции *M. sinensis* были составлены по принципу, предложенному А.А. Новиковой с коллегами (2012). На основе амплифицированных ПЦР-фрагментов ДНК генетические паспорта представлены в виде генетических формул. Генетическая формула содержит сведения о примененном методе, праймерах и обнаруженных у изучаемого образца амплифицированных фрагментах ДНК. Статистическую обработку полученных результатов осуществляли с помощью пакетов программ StatSoft EXCEL 6.0 и STATISTICA v.6.0. Для оценки достоверности отличий изменчивости морфометрических признаков использовали непараметрические критерии (U-тест Манна–Уитни).

## Результаты

### Морфологическая характеристика

Первые полноценные семена *M. sinensis* местной репродукции, завязавшиеся от свободного опыления у двух растений, которые образовали по несколько метелок с качественными зрелыми семенами, были собраны в 2020 г. В дальнейшем из этих семян были выращены растения репродукции первого (G1) и второго (G2) поколений.

Исследование ритмологических и биоморфологических особенностей отобранных форм *M. sinensis* показало, что

в условиях лесостепи Западной Сибири у них отмечено раннее весеннее отрастание и цветение, более раннее (в конце июля), чем у других растений, полученных из семян данного образца. В связи с этим успевали завязаться и вызреть полноценные семена. Цветение последующих побегов растягивается до октября. Для данных форм характерно образование компактных кустов с более короткими корневищами. Особую декоративность растениям придают бордовые побеги и раскидистые метелки (рис. 2).

Соломина густо покрыта гребнями, относится к прямостоячему или полуэректоидному морфотипу, ее высота варьирует в широких пределах, от 160 до 209 см (табл. 1). Листовые пластинки удлинённые, линейные (до 70 см), их ширина составляет от 0.6 до 1.2 см. Края листовых пластинок очень жесткие, средняя жилка белая. Метелка у данного образца *M. sinensis* слегка поникающая, характеризуется 10–25 ветвями, длиной 20–27 см (см. табл. 1). Центральная ось метелки короче разветвлений. Колоски парные. Один из колосков с короткой, а другой с длинной цветоножкой. Длина колосков достигает 4–7 мм. Колоски у основания опушены белыми волосками, длина которых может быть равна длине самого колоска. Эти особенности создают дополнительный декоративный эффект. Достоверных различий изменчивости морфометрических признаков у особей G1 и G2 нами не найдено.

В условиях интродукции изученный образец *M. sinensis* устойчив к местным климатическим условиям, соответствующим II–III зонам морозостойкости по шкале USDA (USDA Plant..., 2024), поэтому зимнего укрытия не требует. В течение пяти лет интродукции *M. sinensis* не поражался болезнями и вредителями и отличался засухоустойчивостью.

Изучение биологии прорастания семян двух поколений *M. sinensis* показало, что при выращивании в теплице начало прорастания в обоих поколениях наблюдалось уже на 3-и сутки; на 7-е сутки энергия всхожести у семян G2 составила на 10 % больше, чем у семян от G1 (табл. 2).

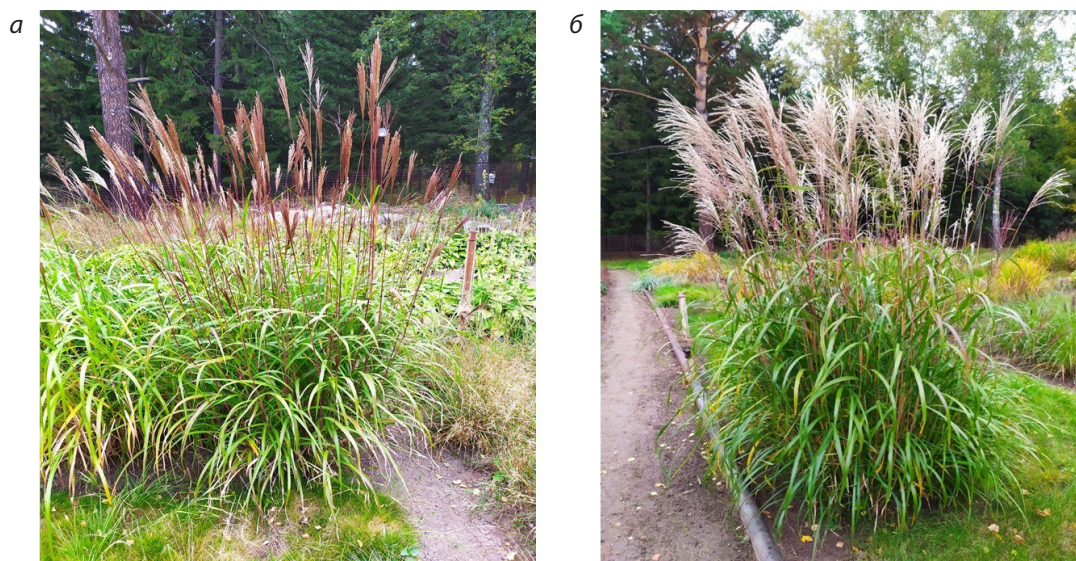


Рис. 2. *M. sinensis* на экспериментальных участках в ЦСБС СО РАН.

а – первое поколение, G1; б – второе поколение, G2.

**Таблица 1.** Морфометрические показатели побегов *M. sinensis* на коллекционном участке ЦСБС СО РАН по окончании вегетационного периода

Образцы	Длина побегов, см		Длина метелки, см		Число листьев, шт.	
S1	178.4		25.7		9.8	
S2	143.3		19.8		9.3	
	$M^* \pm m$	Cv	$M \pm m$	Cv	$M \pm m$	Cv
G1; N = 3	181.4 ± 14.3	13.7	22.4 ± 1.5	11.5	9.2 ± 0.5	10.0
G2; N = 7	169.4 ± 8.5	13.3	23.5 ± 1.4	16.0	7.9 ± 0.2	8.3

\* M – среднее значение; m – ошибка среднего; Cv – коэффициент вариации (%).

**Таблица 2.** Прорастание семян двух поколений *M. sinensis* из семян репродукции ЦСБС СО РАН в лабораторных условиях и в теплице

Показатель	G1	G2
Лабораторная всхожесть (28.02.2023)		
Число семян	150	36
Энергия прорастания, %	84	94
Всхожесть, %	94	100
Посев в теплице (19.01.2023)		
Число семян	72	72
Энергия прорастания, %	78	72
Всхожесть, %	68.0	72.2

На этом массовое прорастание закончилось, и через 21 день всхожесть наблюдаемых образцов увеличилась еще на 10 % в G1, а у G2 взошли все семена.

Представители рода *Miscanthus* в естественных местобитаниях начинают вегетацию при достаточно высоких температурах, поэтому для выращивания рассады (онтогенетические состояния: проростки, ювенильные и иматурные) в теплице нами подобраны оптимальные сроки посева семян.

При посеве семян в конце второй декады января проростки активно росли и развивались, высота их на 10-й день достигала 3 см. Первый настоящий лист появился у большинства растений G2 на 12-й день после посева. Проростки G1 несколько отставали от G2 в развитии. Третий настоящий лист у единичных растений сформировался на 24-й день развития. На 50-й день после посева корневая система достигла 6–8 см в длину, что превышало глубину ячейки на 2–3 см. При этом листья у растений при переходе в иматурное состояние стали заметно желтеть по причине малого объема ячеек для роста и развития. Так как времени до высадки в открытый грунт оставалось еще более месяца, то растения были пересажены в емкости большего размера (7 × 7 см). После пересадки иматурные растения стали активно развиваться, и к моменту высадки в открытый грунт во второй декаде мая их высота варьировала от 9 до 31 см.

Таким образом, рассаду *M. sinensis* в тепличных условиях надо выращивать, проводя посев во второй половине февраля. В этом случае во второй половине мая у растений развивается разветвленная мочковатая корневая система, они переходят в фазу кущения и в данном состоянии готовы для высадки в открытый грунт при наступлении благоприятных температурных условий. Перед высадкой в открытый грунт растениям требуется закаливание. В прогретую землю высаживали рассаду на постоянное место на расстоянии 80–100 см друг от друга. Согласно нашим наблюдениям, у исследованных образцов семена хорошо вызревают и не требуют периода послеуборочного дозаривания, а лабораторные условия более благоприятны для проращивания семян.

### Маркерный анализ

Изучение изменчивости в поколениях G1 и G2 с помощью маркеров ISSR показало в поколении G1 полное единообразие спектров амплификации. В поколении G2 наблюдалась изменчивость, при этом обнаружено пять вариантов генотипов (рис. 3).

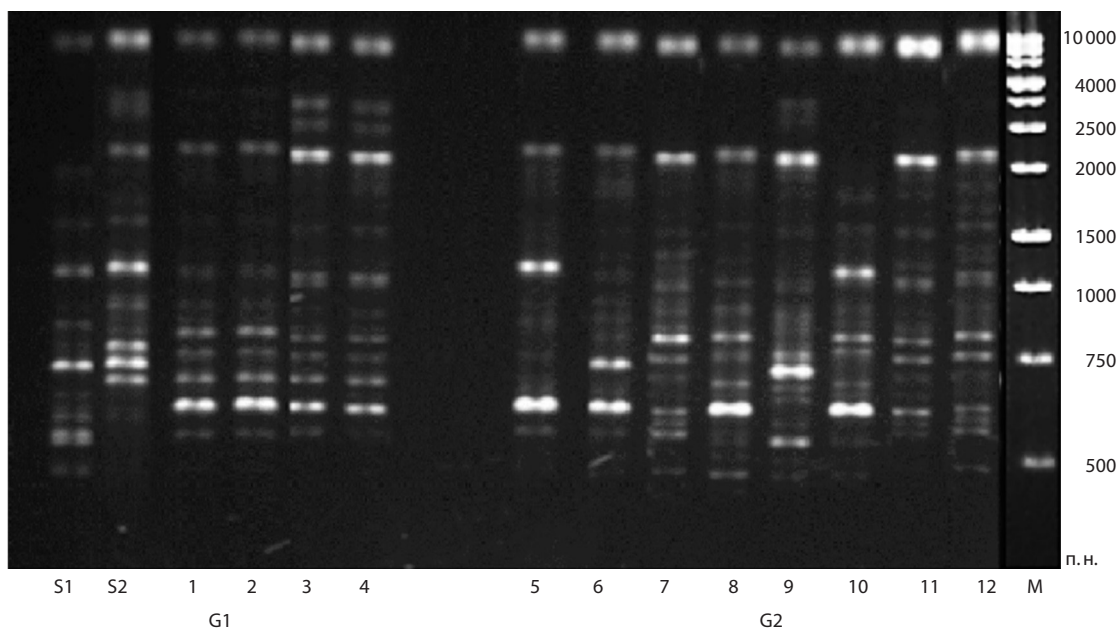
На электрофореграмме в районе менее 10000 п. н. можно видеть компонент, присутствующий в каждом из исследованных образцов (см. рис. 3). У всех образцов, кроме 10, в области 2000–2500 п. н. имеется фрагмент от формы S2. В районе около 1000 п. н. у образцов 5 и 10 и в районе немного менее 750 п. н. у образцов 6 и 9 наблюдаются фрагменты, характерные для обеих форм.

Для отобранных нами перспективных исходных форм S1 и S2 с целью составления генетической формулы было выбрано три маркера, образующих наиболее полиморфные фрагменты (табл. 3). Длина полиморфных фрагментов составила от 300 до 3000 п. н. С помощью (AC)<sub>8</sub>GT-праймера найдено 2 и 4 уникальных фрагмента, они характеризуются наибольшей длиной, 2100 и 3000 п. н. соответственно.

При использовании выявленных уникальных молекулярных полиморфных фрагментов и с учетом генетической формулы, предложенной для *Rhododendron canadense* А.А. Новиковой с коллегами (2012), генетические формулы для отобранных форм S1 и S2 *M. sinensis* выглядят следующим образом:

S1: ISSR/(AC)<sub>8</sub>GT-510,1900/(CA)<sub>6</sub>AG-620,900/(CA)<sub>6</sub>GT-350,650,830

S2: ISSR/(AC)<sub>8</sub>GT-700,900,2100,3000/(CA)<sub>6</sub>AG-600,925/(CA)<sub>6</sub>GT-300,640,850



**Рис. 3.** Электрофореграмма ПЦР-продуктов, полученных при амплификации ДНК у представителей *M. sinensis* и ISSR-праймера UBC-857.

S1, S2 – отобранные формы; дорожки 1–4 – первое поколение (G1), дорожки 5–12 – второе поколение (G2).

**Таблица 3.** Полиморфные фрагменты, уникальные для отобранных форм (S1, S2) *M. sinensis*

Праймер 5'–3'	Число уникальных фрагментов	Длина полиморфных фрагментов, п. н.
UBS875(AC) <sub>8</sub> GT	2/16	S1 510, 1900
	4/16	S2 700, 900, 2100, 3000
17899A(CA) <sub>6</sub> AG	2/9	S1 620, 900
	2/9	S2 600, 925
17898B(CA) <sub>6</sub> GT	3/10	S1 350, 650, 830
	3/10	S2 300, 640, 850

Примечание. Числитель – число уникальных ПЦР-фрагментов; знаменатель – общее число ПЦР-фрагментов.

### Обсуждение

В условиях теплицы прорастание семян двух поколений *M. sinensis* без предварительной обработки было отмечено уже на 3-и сутки, а на 21-й день у G2 взошли все семена. Наибольшая всхожесть семян (98 и 88 %) у *M. sinensis* и *M. sacchariflorus*, выращиваемых в Корее, наблюдалась при температуре 30 °С после скарификации 2 % NaOCl (Lee et al., 2012). Для выяснения причины низкой всхожести семян и поиска методов улучшения качества семян мискантуса польские ученые применяли обработку семян гипохлоритом натрия и коммерческими удобрениями (Orzeszko-Rywka, Rochalska, 2016).

Проведенный нами ранее анализ муссонного климата Владивостока показал, что вегетационный период в данном географическом пункте довольно продолжительный – 175–190 дней (Дорогина и др., 2019). Весенние заморозки характерны для начала мая, а осенние – для начала октября. Наиболее засушлив весенне-летний период, за которым следует длительное летне-осеннее переувлажнение с выпадением осадков до 60 % годовой нормы.

Вероятно, теплая, относительно засушливая первая половина лета в Приморье стимулирует интенсивное фор-

мирование именно генеративных, а не вегетативных органов мискантуса. Дожди во второй половине лета и начале осени способствуют наливу семян и формированию вегетативных органов, включая почки возобновления следующего года. Аналогичную динамику мы наблюдали в г. Новосибирске, в 2023 г. (см. рис. 1). То есть условия вегетационного периода в Новосибирске оказались более близкими к естественным.

Согласно литературным данным, в степной зоне Ставропольского края в течение вегетационных периодов 2019–2021 гг. 13 сортов *M. sinensis* сохраняли ритмические процессы, аналогичные природным (Гречушкина-Сухокурова, 2022). Так, начало вегетации наступало 12.04–17.04, а завершение ростовых процессов в фазе цветения у ранцветущих сортов – с 5.08–12.08, среднецветущих – 16.09–22.09, поздноцветущих – 12.10–18.10. Продемонстрировано также, что динамические показатели линейного роста генеративных побегов коррелируют с суммой эффективных температур вегетационного периода: в 2019 г.  $r = 0.93–0.96$ ; в 2020 г.  $r = 0.85–0.90$ ; в 2021 г.  $r = 0.90–0.92$ . Эти данные согласуются с результатами, полученными нами в лесостепи Западной Сибири. Ото-

бренные нами формы *M. sinensis* обладали способностью продолжительно вегетировать с сохранением декоративности вплоть до наступления зимнего покоя растений и могут успешно выращиваться из семян в условиях континентального климата.

В результате анализа данных, полученных для *M. sinensis* в популяции G2, нами выявлено пять вариантов генотипов, а G. Nie с коллегами (2014) показали, что в результате генотипирования частично фертильных гибридов в гибридной популяции *M. sinensis* обнаружено четыре генотипа, два из которых встречались у большинства растений. В Японии распространены тетраплоидный *M. sacchariflorus* и диплоидный *M. sinensis*, среди них наблюдается гибридизация (Tang et al., 2019).

Однако *M. sinensis* самонесовместим и имеет переносимые ветром пыльцу и семена, которые, как ожидается, ограничивают дифференциацию популяций. Степень дифференциации популяции с применением молекулярных маркеров оценена лишь частично для *M. sinensis* на отдельных ареалах Китая (Chou et al., 2000; Swaminathan et al., 2012).

Из литературных данных известно, что *M. sinensis* – растение с перекрестным типом опыления (Mitros et al., 2020). В целом для представителей этого рода присуща меж- и внутривидовая гибридизация, поэтому они характеризуются богатым генетическим разнообразием и наличием гетерозиса (Zhang et al., 2021). Генетическое разнообразие используется для создания гибридов мискантуса (веерника), которые могут давать более высокие урожаи биомассы и демонстрировать лучшую адаптивность к различным климатическим условиям, чем их родительские виды (Clark et al., 2015). Поскольку искусственная гибридизация нами не проводилась, а два растения, S1 и S2, произрастали на коллекционном участке на небольшом расстоянии друг от друга, кроме того, полученные растения G2 отличались от исходных отобранных форм S1 и S2 высотой, более мощными листьями и стеблями, мы предположили наличие гибридных растений в результате спонтанной гибридизации.

Согласно заключениям, сделанным ранее на основании гистохимического анализа побегов *M. sinensis*, некоторые экземпляры этого вида могут накапливать большое количество лигнина в сухих, завершивших вегетацию соломинах, что может затруднить его промышленную переработку (Дорогина и др., 2019). Поэтому данный вид более перспективен для отбора декоративных форм.

В большинстве литературных источников, посвященных различным аспектам изучения и практического применения видов, форм, гибридов и сортов веерников, отмечается, что в рамках собранного коллекционного генофонда требуются серьезные систематические уточнения (Greef et al., 1997; Nishiwaki et al., 2011; Gifford et al., 2014). Анализ генетического разнообразия может предоставить информацию также о происхождении и составе отдельных линий (Xu et al., 2013; Chen et al., 2022).

Обнаруженная нами фенотипическая и генетическая изменчивость у *M. sinensis* позволяет проводить отбор форм с различными хозяйственно ценными признаками для дальнейшего генетического улучшения и развития сорта с желаемыми признаками. Например, межвидовые

гибриды между *M. sacchariflorus* и *M. sinensis*, такие как *Miscanthus* × *giganteus*, перспективны в культуре для получения биомассы в регионах с умеренным климатом. Такие частично фертильные гибриды интересны для улучшения мискантуса как культуры биомассы, а также качественных характеристик видов *Miscanthus* (Tamura et al., 2016; Chen et al., 2022).

Таким образом, селекционная работа с мискантусом в суровых климатических условиях переходит на принципиально новый уровень – оказывается реальным не только испытывать по большей части случайно выбранные формы, привезенные из естественных местообитаний, но и работать с широким спектром потомства, полученного из семян местных репродукций различных поколений, что увеличивает возможности отбора форм с различными признаками. Перспективны дальнейшее изучение феноритмики, биологии прорастания семян, морфологии и гистохимического анализа побегов; генетического разнообразия; степени дифференциации популяции с использованием молекулярных маркеров и проведение отбора форм растений *M. sinensis*, обладающих ценными декоративными и техническими (технологическими) характеристиками.

## Заключение

Отобранные нами формы *M. sinensis* обладают высокой декоративностью и устойчивостью в интродукции, завязывают жизнеспособные семена, перспективны для семенного размножения и селекции. Они не требуют полива для поддержания декоративности в засушливые периоды. *M. sinensis* успешно произрастает как на открытых, так и в затененных местах, сохраняет декоративность в зимних условиях, под снегом. Потомство исследуемого образца в условиях Западной Сибири проходит все этапы онтогенеза, формирует жизнеспособные семена, сохраняет декоративность с конца июля до октября.

Выявленные полиморфные фрагменты у *M. sinensis* могут быть использованы для идентификации и таксономии, а уникальные молекулярные полиморфные фрагменты, представляющие собой последовательности определенной длины, – основа для паспортизации популяций, форм и линий, перспективных для получения декоративных форм *M. sinensis*. В целом наши результаты помогут в разработке программ селекции с упором на создание сортов *Miscanthus* с элитным потенциалом.

## Список литературы / References

- Анисимов А.А., Медведков М.С., Скороходова А.Н. Особенности формирования урожая различными видами мискантуса (*Miscanthus* spp.). В: Аграрная наука – сельскому хозяйству. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2021; 115-116  
[Anisimov A.A., Medvedkov M.S., Skorokhodova A.N. Yield formation features in different *Miscanthus* species (*Miscanthus* spp.). In: From Agrarian Sciences to Agriculture. Barnaul: Altai State Agricultural University Publ., 2021; 115-116 (in Russian)]  
Берсенева С.А., Ивлева О.Е., Маслова А.О. Технические возможности видов рода Мискантус (*Miscanthus* Anderss.) и перспективы его возделывания на территории Приморского края. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020;7/2:6-10. doi 10.23670/IRJ.2020.97.7.033

- [Berseneva S.A., Ivleva O.E., Maslova A.O. Performance potential of species of *Miscanthus* Anderss. and genus and prospects of its cultivation in Primorsky Krai. *Meždunarodnyj Naučno-issledovatel'skij Žurnal = Int Res J.* 2020;7/2:6-10. doi 10.23670/IRJ.2020.97.7.033 (in Russian)]
- Гречушкина-Сухорукова Л.А. Динамика ростовых процессов и декоративное состояние мискантуса китайского при интродукции в степной зоне. *Аграрная наука.* 2022;(7-8):178-182. doi 10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-178-182
- [Grechushkina-Sukhorukova L.A. Dynamics of growth processes and decorative state of *Miscanthus sinensis* during introduction in the steppe zone. *Agrarnaya Nauka = Agrar Sci.* 2022;(7-8):178-182. doi 10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-178-182 (in Russian)]
- Гущина В.А., Володькин А.А., Остробородова Н.И., Агапкин Н.Д., Летучий А.В. Особенности роста и развития интродуцента мискантуса гигантского (*Miscanthus giganteus*) в условиях лесостепи Среднего Поволжья. *Аграрный научный журнал.* 2018;1:10-13. doi 10.28983/asj.v0i1.318
- [Gushchina V.A., Volod'kin A.A., Ostroborodova N.I., Agapkin N.D., Letuchiy A.V. Peculiarities of growth and development of introduction of *Miscanthus giganteus* in the conditions of forest-steppe zone in Middle Volga. *Agrarnyi Nauchnyi Zhurnal = Agrar Sci J.* 2018;1:10-13. doi 10.28983/asj.v0i1.318 (in Russian)]
- Дорогина О.В., Васильева О.Ю., Нуждина Н.С., Буглова Л.В., Гисматулина Ю.А., Жмудь Е.В., Зуева Г.А., Комина О.В., Цыбченко Е.А. Ресурсный потенциал некоторых видов рода *Miscanthus* Anderss. в условиях континентального климата лесостепи Западной Сибири. *Вавиловский журнал генетики и селекции.* 2018;22(5):553-559. doi 10.18699/VJ18.394
- [Dorogina O.V., Vasilyeva O.Yu., Nuzhdina N.S., Buglova L.V., Gismatulina Yu.A., Zhmud E.V., Zueva G.A., Komina O.V., Tsybchenko E.A. Resource potential of some species of the genus *Miscanthus* Anderss. under conditions of continental climate of West Siberian forest-steppe. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed.* 2018;22(5):553-559. doi 10.18699/VJ18.394 (in Russian)]
- Дорогина О.В., Васильева О.Ю., Нуждина Н.С., Буглова Л.В., Жмудь Е.В., Зуева Г.А., Комина О.В., Кубан И.С., Гусар А.С., Дудкин Р.В. Формирование и изучение коллекционного генофонда ресурсных видов рода *Miscanthus* Anderss. в условиях лесостепи Западной Сибири. *Вавиловский журнал генетики и селекции.* 2019;23(7):926-932. doi 10.18699/VJ19.568
- [Dorogina O.V., Vasilyeva O.Yu., Nuzhdina N.S., Buglova I.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. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed.* 2019;23(7):926-932. doi 10.18699/VJ19.568 (in Russian)]
- Дорогина О.В., Нуждина Н.С., Зуева Г.А., Гисматулина Ю.А., Васильева О.Ю. Особенности побегообразования в популяциях *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) под влиянием экологических факторов и паспортизация с помощью ISSR-маркеров. *Вавиловский журнал генетики и селекции.* 2022;26(1):22-29. doi 10.18699/VJGB-22-04
- [Dorogina O.V., Nuzhdina N.S., Zueva G.A., Gismatulina Yu.A., Vasilyeva O.Yu. Specific shoot formation in *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) under different environmental factors and DNA passportization using ISSR markers. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed.* 2022;26(1):22-29. doi 10.18699/VJGB-22-04]
- Дурягина Г.П. К методике интродукции редких и исчезающих растений. *Ботанический журнал.* 1982;67(5):679-687
- [Duryagina G.P. On the method of introducing rare and endangered plants. *Botanicheskii Zhurnal.* = *Bot J.* 1982;67(5):679-687 (in Russian)]
- Зуева Г.А. Интродукция декоративных злаков и осок в Центральном сибирском ботаническом саду Сибирского отделения Российской академии наук. *Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал.* 2020;3(35):30-41. doi 10.32516/2303-9922.2020.35.3
- [Zueva G.A. Introduction of ornamental cereals and sedges in the Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. *Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal.* 2020;3(35):30-41. doi 10.32516/2303-9922.2020.35.3 (in Russian)]
- Капустянчик С.Ю., Бурмакина Н.В., Якименко В.Н. Оценка эколого-агрохимического состояния агроценоза с многолетним выращиванием мискантуса в Западной Сибири. *Агрохимия.* 2020;9:65-73. doi 10.31857/S0002188120090082
- [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;9:65-73. doi 10.31857/S0002188120090082 (in Russian)]
- Кашин А.С., Крицкая Т.А., Шанцер И.А. Генетический полиморфизм *Tulipa gesneriana* L. по данным ISSR маркирования. *Генетика.* 2016;52(10):1134-1145. doi 10.7868/S0016675816100040
- [Kashin A.S., Kritskaya T.A., Schanzer I.A. Genetic polymorphism of *Tulipa gesneriana* L. evaluated on the basis of the ISSR marking data. *Russ J Genet.* 2016;52(10):1023-1033. doi 10.1134/S1022795416100045]
- Методы определения качества семян сельскохозяйственных культур. В: Семена и посадочный материал сельскохозяйственных культур. М.: Изд-во стандартов, 1973;238-405
- [Methods for testing crop and planting material quality. In: Crop Seeds and Planting Material. Moscow: Izdatel'stvo Standartov, 1973;238-405 (in Russian)]
- Новикова А.А., Шейкина О.В., Новиков П.С., Доронина Г.У. Оценка возможности применения ISSR-маркеров для систематизации и генетической паспортизации растений рода *Rhododendron*. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета.* 2012;82(82):916-926
- [Novikova A.A., Sheikina O.V., Novikov P.S., Doronina G.U. Estimation of the ISSR-markers application for systematization and genetic certification of genus *Rhododendron*. *Politematicheskij Setevoy Elektronnyj Nauchnyj Zhurnal Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta = Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University.* 2012;82(82):916-926 (in Russian)]
- Поцелуев О.М., Капустянчик С.Ю. Оценка возможности выращивания мискантуса под покровом зерновых культур. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета.* 2018;10(168):55-60.
- [Potseluyev O.M., Kapustyanchik S.Yu. Assessment of the feasibility of growing *Miscanthus* under a cover of cereal crops. *Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University.* 2018;10(168):55-60 (in Russian)]
- Якименко В.Н., Капустянчик С.Ю., Галицын Г.Ю. Возделывание мискантуса в континентальных регионах России. *Земледелие.* 2021;2:27-31. doi 10.24411/0044-3913-2021-10206
- [Yakimenko V.N., Kapustyanchik S.Yu., Galitsyn G.Yu. Cultivation of *Miscanthus* in continental regions of Russia. *Zemledelie = Agriculture.* 2021;2:27-31. doi 10.24411/0044-3913-2021-10206 (in Russian)]
- Chae W.B., Hong S.J., Gifford J.M., Rayburn A.L., Sacks E.J., Juvik J.A. Plant morphology, genome size, and SSR markers differentiate five distinct taxonomic groups among accessions in the genus *Miscanthus*. *GCB Bioenergy.* 2014;6:646-660. doi 10.1111/gcbb.12101
- Chen Z., He Yu., Iqbal Yu., Shi Y., Huang H., Yi Z. Investigation of genetic relationships within three *Miscanthus* species using SNP markers identified by SLAF-seq. *BMC Genomics.* 2022;23(1):43. doi 10.1186/s12864-021-08277-8
- Chou C.-H., Chiang Y.-C., Chiang T.-Y. Genetic variability and phylogeography of *Miscanthus sinensis* var. *condensatus*, an apomictic



- grass, based on RAPD fingerprints. *Can J Bot.* 2000;78(10):1262-1268. doi 10.1139/b00-102
- Clark L.V., Ryan S., Nishiwaki A., Toma Yo., Zhao H., Peng J., Yoo J.H., Heo K., Yu Ch.Y., Yamada T., Sacks E.J. Genetic structure of *Miscanthus sinensis* and *Miscanthus sacchariflorus* in Japan indicates a gradient of bidirectional but asymmetric introgression January. *J Exp Bot.* 2015;66(14):4213-4225. doi 10.1093/jxb/eru511
- Doyle J.J., Doyle J.L. A rapid DNA isolation of fresh leaf tissue. *Phytochem Bull.* 1987;19:11-15
- Gifford J.M., Chae W.B., Juvik J.A., Swaminathan K., Moose S.P. Mapping the genome of *Miscanthus sinensis* for QTL associated with biomass productivity. *GCB Bioenergy.* 2014;7(4):797-810. doi 10.1111/gcbb.12201
- Greef J.M., Deuter M., Jung C., Schondelmaier J. Genetic diversity of European *Miscanthus* species revealed by AFLP fingerprinting. *Genet Resour Crop Evol.* 1997;44(2):185-195. doi 10.1023/A:1008693214629
- Lee K.Y., Zhang L., Lee G.-J. Botanical and germinating characteristics of *Miscanthus* species native to Korea. *Hort Environ Biotechnol.* 2012;53(6):490-496. doi 10.1007/s13580-012-0137-9
- Mitros T., Session A.M., James B.T., Wu G.A., Belaffif M.B., Clark L.V. Genome biology of the paleotetraploid perennial biomass crop *Miscanthus*. *Nat Commun.* 2020;11:5442. doi 10.1038/s41467-020-18923-6
- Nei M., Li W.H. Mathematical model for studying genetic variation in terms of restriction endonucleases. *Proc Natl Acad Sci USA.* 1979; 76(10):5269-5273. doi 10.1073/pnas.76.10.5269
- Nie G., Zhang X.-Q., Huang L.-K., Xu W.-Z., Wang J.-P., Zhang Y.-W., Ma X., Yan Y.-H., Yan H.-D. Genetic variability and population structure of the potential bioenergy crop *Miscanthus sinensis* (Poaceae) in southwest China based on SRAP markers. *Molecules.* 2014; 19(8):12881-12897. doi 10.3390/molecules190812881
- Nishiwaki A., Mizuguti A., Kuwabara S., Matuura H., Yamaguchi S., Toma Y., Miyashita T., Yamada T., Ishigaki G., Akashi R., Rayburn L.A., Stewart J.R. Discovery of natural *Miscanthus* (Poaceae) triploid plants in sympatric populations of *Miscanthus sacchariflorus* and *Miscanthus sinensis* in southern Japan. *Am J Bot.* 2011; 98(1):154-159. doi 10.3732/ajb.1000258
- Orzeszko-Rywka A., Rochalska M. Possibility of seed quality improvement in *Miscanthus sinensis* (Andersson). *J Res Appl Agric Engng.* 2016;61(4):83-88
- Swaminathan K., Chae W.B., Mitros T., Kranthi V., Xie L., Barling A., Glowacka K., Hall M., Jezowski S., Ming R., Hudson M., Juvik J.A., Rokhsar D.S. Moose S.P. A framework genetic map for *Miscanthus sinensis* from RNAseq-based markers shows recent tetraploidy. *BMC Genomics.* 2012;13:142. doi 10.1186/1471-2164-13-142
- Tamura K., Uwatoko N., Yamashita H., Fujimori M., Akiyama Y., Shoji A., Sanada Y., Okumura K., Gau M. Discovery of natural interspecific hybrids between *Miscanthus sacchariflorus* and *Miscanthus sinensis* in Southern Japan: morphological characterization, genetic structure, and origin. *BioEnergy Res.* 2016;9(1):315-325. doi 10.1007/s12155-015-9683-1
- Tang Y.-M., Xiao L., Iqbal Y., Liao J.-F., Xiao L.-Q., Yi Z.-L., She C.-W. Molecular cytogenetic characterization and phylogenetic analysis of four *Miscanthus* species (Poaceae). *Comp Cytogenet.* 2019;13(3): 211-230. doi 10.3897/CompCytogen.v13i3.35346
- USDA Plant Hardiness Zone Map <https://planthardiness.ars.usda.gov/> (accessed: 03.2024)
- Van de Peer Y.V., De Wachter R.D. Construction of evolutionary distance trees with TREECON for Windows: accounting for variation in nucleotide substitution rate among sites. *Bioinformatics.* 1997; 13(3):227-230. doi 10.1093/bioinformatics/13.3.227
- Xu W.Z., Zhang X.Q., Huang L.K., Nie G., Wang J.P. Higher genetic diversity and gene flow in wild populations of *Miscanthus sinensis* in southwest China. *Biochem Syst Ecol.* 2013;48:174-181. doi 10.1016/j.bse.2012.11.024
- Zhang G., Ge C., Xu P., Wang S., Cheng S., Han Y., Wang Y., Zhuang Y., Hou X., Yu T., Xu X., Yang Y., Yin X., Wang W., Liu W., Zheng C., Sun X., Wang Z., Ming R., Dong S., Ma J., Zhang X., Chen C. The reference genome of *Miscanthus floridulus* illuminates the evolution of Saccharinae. *Nat Plants.* 2021;7:608-618. doi 10.1038/s41477-021-00908-y

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.05.2024. После доработки 06.11.2024. Принята к публикации 07.11.2024.