

Альтернативная энергетика: новые ресурсы биотоплива из растительного сырья

© 2017. Г. А. Булаткин, д. б. н., в. н. с.,
Г. В. Митенко, н. с., И. Д. Гурьев, инженер,
Институт фундаментальных проблем биологии РАН,
142290, Россия, Московская область, г. Пущино, ул. Институтская, 2,
e-mail: sadovod@rambler.ru

Для производства биотоплива второго поколения, наряду с отходами деревопереработки, перспективно сырьё, получаемое из травянистых растений, например, из мискантуса китайского (*Miscanthus sinensis* Anderss.) (Poaceae).

Исследования показали, что в среднем урожай надземной биомассы мискантуса за пять лет в варианте без удобрений составил 7,0 т/га сухого вещества (с колебаниями от 5,0 до 11,2 т/га), а при внесении удобрения – 12,1 т/га с колебаниями от 5,3 до 19,4 т/га в год. Мискантус является экологически эффективной полевой культурой. За пятилетний период в агроэкосистеме мискантуса содержание гумуса в верхнем 20-сантиметровом слое почвы увеличилось на 0,31%, в слое 20–40 см – на 0,26%. Энергетическая эффективность возделывания мискантуса (соотношение энергии, содержащейся в надземной биомассе с суммарными затратами технической энергии на возделывание и уборку урожая) в среднем за 5 лет исследований оказалась высокой и составила в варианте без удобрений около 11, а при внесении минеральных удобрений – около 12. Представленные экспериментальные данные показывают высокую агрономическую, энергетическую и экологическую эффективность возделывания мискантуса на серых лесных почвах южного Подмосковья и перспективность дальнейших подробных исследований в других регионах России.

Ключевые слова: биотопливо, альтернативная энергетика, серые лесные почвы, энергетическая эффективность, мискантус китайский (*Miscanthus sinensis* Anderss.), биопродуктивность.

Alternative power engineering: new resources vegetation materials

G. A. Bulatkin, G. V. Mitenko, I. D. Guriev,
Institute of Basic Biological Problems RAS,
2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,
e-mail: sadovod@rambler.ru

Raw material used for production of second generation biofuel is received not only from wood processing oddments, but also from grass, such as *Miscanthus sinensis* Anderss., which is very useful in perspective.

The research resulted in the fact that the yield of *Miscanthus sinensis* Anderss. within five years in the experiment without any fertilizer was 7.0 t/hectare of solid stuff on the average (from 5.0 to 11.2 t/hectare), and in case of fertilizer introduction it was 12.1 t/hectare (from 5.3 to 19.4 t/hectare) per year. *Miscanthus sinensis* Anderss. is ecologically effective field culture and within five-years of this plant's presence in the agroecosystem the content of a humus in the soil significantly increased. On the average, during 5 years of research energy efficiency of cultivation of *Miscanthus sinensis* Anderss. in gray forest soils (a ratio of the energy contained in elevated biomass with the spent technical energy on cultivation and harvesting) was 11 in case without fertilizers, which is rather high, and about 12 in case of mineral fertilizers introduction. The experimental data show a high agronomic, energy, and ecological efficiency of *Miscanthus sinensis* Anderss. cultivation on gray forest soils of south near Moscow region, they also show that some further detailed research of the kind should be made in other regions in Russia.

Keywords: biofuel, alternative power engineering, gray forest soils, energy efficiency, *Miscanthus sinensis* Anderss., bioproductivity.

В настоящее время во многих странах делаются интенсивные попытки получения жидкого топлива из продукции растениеводства. В России основными источниками сырья для

получения биотоплива может рассматриваться побочная продукция растениеводства и деревопереработки, торф, в будущем – биомасса мискантуса, древесина энергетических лесов и т. д.

Следует отметить, что при производстве возобновляемой энергии должна ставиться задача получения дополнительной энергии (больше затраченной), т. е. энергии сверх суммы прямых и косвенных энергетических затрат на производство нового энергоносителя.

Однако производство альтернативной энергии с нулевым или отрицательным балансом возможно, если при её использовании достигается положительный **экологический эффект** в местах потребления «чистой» энергии.

Например, в России на долю автотранспорта приходится 90% общего объёма вредных веществ, поступающих от всех видов транспорта [1]. По величине выбросов автомобильного транспорта в нашей стране резко выделяется г. Москва – на её долю приходится более 800 тыс. т выбросов в год. Подсчитано, что за расчётное время эксплуатации, равное 6 годам, усреднённый автомобиль, работающий на углеводородном топливе, выбрасывает в атмосферу 9 т CO₂; 0,9 т CO; 0,25 т NO₂ и 80 кг углеводородов, не считая тяжёлые металлы, бенз(а)пирен, оксиды серы и другие поллютанты. Не менее 50% свинца в атмосфере на территории России связаны с выхлопами автомобилей. Загрязнение приземного слоя атмосферного воздуха в городах резко отрицательно влияет на здоровье людей, животных и жизнедеятельность растений, состояние зданий и сооружений и т. д. Замена чистого бензина на биотопливо в автотранспорте позволит существенно улучшить экологическую ситуацию в городах и промышленных агломерациях.

В настоящее время в Институте фундаментальных проблем биологии РАН разработаны методики оценки энергетической эффективности возделывания полевых культур, выявлены закономерности формирования затрат технической энергии на производство биомассы в цепи «поле – завод», показана нецелесообразность отчуждения органического вещества из агросферы и торфяных залежей в целях производства жидкого топлива в современной России [2]. Из трёх основных источников растительной биомассы главным резервом производства биотоплива второго поколения могут быть отходы деревопереработки, в результате использования которых, может быть произведено к 2020 г. около 954 млн ГДж технической энергии в виде биоэтанола. Даже при энергетической эффективности переработки древесной биомассы на уровне 30% суммарная прибавка энергии не превысит 1% топливно-энергетического баланса страны. В связи с

этим такие небольшие дополнительные величины энергии в форме экологически чистого топлива требуют рационального применения. Биотопливо необходимо применять внутри страны в качестве добавок к автомобильному бензину для улучшения атмосферы в крупных городах и промышленных агломерациях.

В России из хозяйственного оборота в последние два десятилетия выведено, по данным различных авторов, около 20–40 млн га пахотных земель, которые можно использовать для производства биоэнергии. Во многих регионах Нечерноземья и Сибири около 50% пашни практически не используется [3].

В мире появилось перспективное направление производства энергии из биомассы, получаемой при выращивании энергетических лесов, посевов трав. Для производства биотоплива второго поколения, наряду с остатками деревопереработки, перспективно сырьё, полученное из мискантуса китайского (*Miscanthus sinensis* Anderss.), который также называют «китайский камыш». Мискантус – род многолетних травянистых растений семейства мятликовых. Растения этого рода хорошо растут на различных типах почв, кроме песков и тяжёлых глин, прекрасно себя чувствуют на переувлажнённых участках, но могут расти и на относительно сухих местах. Предпочитают тёплый, влажный климат, но многие сорта и виды адаптировались к условиям средней полосы России. Размножаются мискантусы делением куста весной. Продуктивность его новых форм, выведенных в Институте цитологии и генетики СО РАН, составляет 10–15 т/га·год сухой биомассы [4]. Урожайность сухой биомассы мискантуса во Франции составляет 20 т/га [5]. Мискантус китайский можно бессменно на протяжении 15–20 лет культивировать на одном поле. Влияние мискантуса на гумусовый баланс в почве требует дополнительных подробных исследований в разных регионах страны.

Наиболее рациональный способ уборки заключается в транспортировке биомассы от поля до биоцеха без промежуточного хранения. Это означает необходимость размещать насаждения мискантуса в непосредственной близости к месту переработки.

Преимущество данного травянистого растения перед энергетическими лесами заключается, прежде всего, в том, что товарную продукцию получают уже со второго года после посадки. В дальнейшем уборка биомассы может производиться как через год, так и ежегодно. Для уборки биомассы не требуется

специализированной дорогостоящей техники, и скашивание может производиться обычными кукурузоуборочными комбайнами.

В случае необходимости, посадки мискантуса легко заменить на сельскохозяйственные культуры без существенного нарушения почвенного покрова, в отличие от энергетических лесов.

Мискантус образует плотную дернину. Это свойство растений является чрезвычайно полезным для борьбы с водной эрозией почвы на склоновых землях. Если принять, что с 1 га под посевом кукурузы в год смывается в среднем около 30 т почвы, то на воспроизводство только гумуса внесением органических удобрений необходимо вложить 1805 МДж/га невозобновимой энергии [6]. Возделывание мискантуса позволяет сократить эти непроизводительные затраты.

Посадка мискантуса, даже на части площади пашни России, не занятой сельскохозяйственными культурами, позволит получить большое количество растительной биомассы, сохранить и даже повысить содержание гумуса в почве, предотвратить зарастание пашни кустарником и редколесьем. Биомасса в начале эксплуатации насаждений может быть использована для производства топливных пеллет и брикетов, получения целлюлозы, а после строительства биоэлектростанций – и для производства жидкого биотоплива.

Цель работы – изучение круговорота химических элементов и потоков энергии в агроэкосистеме новой культуры для зоны серых лесных почв – мискантуса китайского (*Miscanthus sinensis* Anderss.). В настоящей публикации обсуждается вопрос биопродуктивности, энергетической и экологической эффективности исследуемой культуры.

Объекты и методы исследования

На серых лесных почвах заложен микрополевым опытом с мискантусом китайским. Экспериментальный участок расположен в южном Подмоскowie со следующими координатами 54°49 с. ш. и 37°35 в. д. Предусмотрены два варианта: 1. Контроль (без удобрений); 2. Внесение минеральных удобрений в дозе $N_{120}P_{100}K_{100}$ при закладке опыта и повторно через 3 года. Площадь делянки 10 м², повторность 4-х кратная. Закладка плантации произведена весной 7 мая 2012 г. методом посадки делённых корневищ. Расстояние между рядами – 60 см, между растениями – 20 см. В течение вегетации определяли температуру на поверхности по-

чвы, на глубинах 5, 10, 15, 20 и 40 см, влажность почвы по горизонтам 0–20, 20–40 см, отмечали наступление фенологических фаз. Уборка урожая надземной массы проводилась осенью, перед наступлением первых морозов. Биомассу с делянки взвешивали на технических весах, в средних пробах определяли влажность. Пробы растений с каждого варианта растений разбирали на зелёные листья, сухие листья, стебли и метёлки. После высушивания определяли соотношение сухой биомассы частей растений. Статистическая обработка результатов учёта урожая осуществлялась согласно методике [7] с использованием MSExcel 2010. Затраты технической энергии рассчитывали в соответствии с методикой [8].

Ежегодные затраты энергии на уход за производственной плантацией и уборку составляют небольшую величину: это внесение минеральных удобрений и раннее весеннее боронование, а также скашивание надземной биомассы с помощью кукурузоуборочного комбайна.

В сумме затраты на удобренном варианте на 1 год эксплуатации посадок оцениваются в 19310 МДж/га прямых и косвенных вложений технической энергии (энергия, содержащаяся в топливе, амортизация сельскохозяйственных машин, трудовые затраты и т. д.) с учётом амортизации энергозатрат на закладку плантации.

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что в среднем за пять лет урожай надземной биомассы мискантуса в варианте без удобрений составил 7,0 т/га сухого вещества с колебаниями от 5,0 до 11,2 т/га, а при внесении удобрений – 12,1 т/га с колебаниями от 5,3 до 19,4 т/га в год (табл. 1).

Для корректного анализа потоков антропогенной энергии в агроэкосистемах энергозатраты на производство урожая культурных растений должны включать две статьи: на выращивание культуры и на воспроизводство параметров агрономически значимых свойств и режимов почв до уровня, предшествующего возделыванию культуры.

Эти две величины в сумме составляют *совокупные затраты* антропогенной энергии в данной агроэкосистеме [6]. На посадках мискантуса затраты на восстановление почвенного плодородия связаны только с нейтрализацией почвенной кислотности, вызванной внесением физиологически кислых минеральных удобрений.

Таблица 1

Урожай надземной биомассы мискантуса китайского на серых лесных почвах, т/га абс. сух. вещества

Вариант	Годы					Среднее за 5 лет
	2012	2013	2014	2015	2016	
Контроль (без удобрений)	5,0	11,2	7,6	6,0	5,2	7,0
$N_{120}P_{100}K_{100}$ (при закладке и в 2015 г.)	5,3	17,7	8,1	10,0	19,4	12,1
$НСР_{05}$	0,5	1,1	0,7	0,8	2,0	–

Таблица 2

Энергетическая эффективность возделывания мискантуса китайского на серых лесных почвах

Вариант	Годы					Среднее за 5 лет
	2012	2013	2014	2015	2016	
Контроль (без удобрений)	9,2	25,0	11,9	9,5	8,3	10,9
$N_{120}P_{100}K_{100}$ (при закладке и в 2015 г.)	6,3	23,9	8,7	9,4	20,4	11,9

Мискантус является экологически эффективной полевой культурой. Наши исследования показали, что за пятилетний период в агроэкосистеме мискантуса содержание гумуса в почве существенно увеличилось. В варианте без удобрений (контроль) содержание гумуса в слое почвы 0–20 см повысилось с 1,74 в 2012 г. до 2,05% в слое 20–40 см – с 1,20 до 1,46%. Это произошло за счёт большого поступления в почву органического вещества ввиду отпада корней, масса которых в 1,5 раза больше, чем у кукурузы [9]. На удобренном варианте увеличения практически не произошло (содержание гумуса в 2016 г. в верхнем 20 см слое почвы составило 1,85%, в слое 20–40 см – 1,29%). Стабилизация содержания гумуса в почве удобренного варианта связана в основном с отрицательным влиянием интенсивного внесения минеральных удобрений на гумусовый пул серой лесной почвы. По-видимому, происходила дополнительная минерализация органического вещества почвы под действием азотного удобрения [10].

В многолетнем эксперименте был также изучен в сравнительном аспекте температурный режим почвы под мискантусом китайским и яровой пшеницей. Исследования показали, что в вегетационные периоды в агроэкосистеме мискантуса существенно снижается температура почвы как на поверхности, так и на глубинах 5 и 20 см [11].

Расчёты показали высокую энергетическую эффективность выращивания мискантуса на серых лесных почвах. Как видно из данных таблицы 2, в среднем за 5 лет соот-

ношение содержания энергии в уборной наземной биомассе растений мискантуса и затратами технической энергии на выращивание и уборку составило 10,9 и 11,9. Таким образом, на каждый МДж затраченной технической энергии получено около 11–12 МДж энергии в биомассе.

Заключение

Представленные данные показывают высокую агрономическую, энергетическую и экологическую эффективность возделывания мискантуса на серых лесных почвах и перспективность дальнейших подробных исследований этой культуры в различных регионах России.

Предварительно требуется разработка и апробирование технологий возделывания мискантуса в разнообразных почвенно-климатических зонах страны, а также разработка системы удобрений и оценки энергетической эффективности его производства.

Следующим шагом является районирование территории России с учётом биоклиматического потенциала для энергетически эффективного возделывания мискантуса.

Литература

1. Природные ресурсы и экология России. Федеральный атлас. Изд. 2-е / Под ред. Н.Г. Рыбальского и В.В. Снакина. М.: НИА-Природа, 2003. 148 с.
2. Bulatkin G.A. Producing second-generation biofuel from plant materials // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2010. V. 80. № 3. P. 294–298.

3. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под ред. С.А. Шобы. М.: Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Изд-во «АСТРЕЛЬ». 2011. 632 с.

4. Шумный В.К., Вепрев С.Г., Нечипоренко Н.Н., Горячковская Т.Н., Слынько Н.М., Колчанов Н.А., Пелтек С.Е. Новая форма мискантуса китайского (веерника китайского *Miscanthus sinensis* Anderss.) как перспективный источник целлюлозосодержащего сырья // Вестник Вавиловского общества генетиков и селекционеров. 2010. Т. 14. №1. С. 122–126.

5. Ракитова О. Французы гранулируют мискантус // Thebioenergy international. 2007. № 4. С. 25.

6. Булаткин Г.А. Эколого-энергетические основы повышения продуктивности агроэкосистем. М.: НИИ-Природа, 2008. 366 с.

7. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М., Агрпромиздат. 1985. 351 с.

8. Булаткин Г.А. Энергетическая эффективность применения удобрений в агроценозах. Методические указания. Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР. 1983. 46 с.

9. Schneckenberger K., Kuzyakov Ya. Carbon sequestration under *Miscanthus* in sandy and loamy soils estimated by natural ¹³C abundance // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2007. № 4. P. 538–542.

10. Кудеяров В.Н. Цикл азота и эффективность удобрений. М.:Наука. 1989. 216 с.

11. Bulatkin G.A., Guriev I.D. Efficiency of cultivation of chinese silver grass (*Miscanthus sinensis* Anderss.) on gray forest soils of southern Moscow region territory, Russia // Italian Science Review. 2016. V. 1 (34). P. 151–155.

References

1. Natural resources and environment of Russia. Federal atlas. M.: NIA-Priroda. 2003. 148 p. (in Russian).

2. Bulatkin G.A. Producing second-generation biofuel from plant materials // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2010. V. 80. № 3. P. 294–298 (in Russian).

3. National atlas of soils of the Russian Federation / Pod red. S.A. Shoby. M.: Facultet Pochvovedeniya MGU im. M.V. Lomonosova. M.: ASTREL. 2011. 632 p. (in Russian).

4. Shumny V.K., Veprev S.G., Nechiporenko N.N., Goryachkovskaya T.N., Slunko N.M., Kolchanov N.A., Peltek S.E. A new variety of *Miscanthus sinensis* Anderss. is a promising source of cellulosic material // Vestnik VOGiS. 2010. V. 14. № 1. P. 122–126 (in Russian).

5. Rakitova O. The French pelletize miscanthus // The bioenergy international. № 4. 2007. P. 25 (in Russian).

6. Bulatkin G.A. Ecological-energy basis of optimization of agroecosystems productivity. M.: NIA-Priroda. 2008. 366 p. (in Russian).

7. Dospekhov B. A. Experimental technique in field experiments. M.: Agropromizdat. 1985. 351 p. (in Russian).

8. Bulatkin G.A. Energy efficiency of fertilizers use in agroecosystems. Pushchino ONTI NtsBI AN SSSR. 1983. 46 p. (in Russian).

9. Schneckenberger K., Kuzyakov Ya. Carbon sequestration under *Miscanthus* in sandy and loamy soils estimated by natural ¹³C abundance // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2007. № 4. P. 538–542.

10. Kudeyarov V.N. Nitrogen cycle and fertilizer efficiency. M.: Nauka. 1989. 216 p. (in Russian).

11. Bulatkin G.A., Guriev I.D. Efficiency of cultivation of chinese silver grass (*Miscanthus sinensis* Anderss.) on gray forest soils of southern Moscow region territory, Russia // Italian Science Review. 2016. V. 1 (34). P. 151–155 (in Italian).