



## РЕЗУЛЬТАТЫ СИМБИОТИЧЕСКОЙ СЕЛЕКЦИИ ЛЮЦЕРНЫ

✉ **Степанова Г.В.**

*Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса*

Московская область, г. Лобня, Россия

✉ e-mail: gvstep@yandex.ru

Представлены результаты исследований эффективности симбиоза сортов люцерны, созданных разными способами. Выявлены некоторые особенности растительно-ризобиальных взаимодействий. При выращивании люцерны на слабокислой и близкой к нейтральной почве (рН 5,1–6,0) наиболее высокие прибавки урожайности по сухому веществу обеспечивала предпосевная инокуляция штаммом СХМ 412б, на сильно- и среднекислой почве (рН 4,1–5,0) – штаммом СХМ 404б. В год посева эффективность симбиоза составляла не менее 25%, снижение урожайности до уровня контроля происходило в течение 3–4 лет пользования. Штамм СХМ 404б обладает уникальной способностью повышать семенную продуктивность сортов в разных условиях выращивания на 23–56%, другие штаммы – на 3–32%. Установлено, что продуктивность сорто-микробных систем в основном определяется штаммом клубеньковых бактерий (влияние инокуляции 60–62%). Не выявлено связи между урожайностью надземной биомассы и содержанием в ней сырого протеина. Коэффициенты корреляции, полученные в разных полевых опытах, составили  $-0,41 \pm 0,34$  –  $0,26 \pm 0,39$ . Предпосевная инокуляция высокоактивными штаммами ризобий семян люцерны изменчивой сортов Селена, Агния, Таисия, созданных с использованием методов сопряженной симбиотической селекции, повысила урожайность в год посева на 26–35% по сухому веществу и на 44–56% по семенам. Урожайность сортов Вега 87, Луговая 67, Пастбищная 88, Находка, созданных традиционными методами, возрастала на 3–20% по сухому веществу и на 23–29% по семенам. Предпосевная инокуляция активными штаммами ризобий сортов люцерны, созданных симбиотическими методами селекции, повысила урожайность в первый год пользования на 46–128% на участках, где люцерну прежде не выращивали, и на 32–35% в севообороте с высоким насыщением посевами люцерны.

**Ключевые слова:** люцерна, штаммы, клубеньковые бактерии, симбиоз, сопряженная селекция, урожайность

## RESULTS OF SYMBIOTIC BREEDING OF ALFALFA

✉ **Stepanova G.V.**

*Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology*

Lobnya, Moscow region, Russia

✉ e-mail: gvstep@yandex.ru

The results of the studies on the effectiveness of alfalfa symbiosis varieties created by different methods are presented. Some peculiarities of plant-rhizobial interactions are identified. When alfalfa was grown in low- and near-neutral soils (pH 5.1-6.0), the highest increase in dry matter yield was achieved by pre-sowing inoculation with the CXM 412b strain, and on strongly and moderately acidic soils (pH 4.1-5.0) by the CXM 404b strain. In the year of sowing, the efficiency of symbiosis was at least 25%, and the yield reduction to the control level occurred during 3-4 years of use. Strain CXM 404b has the unique ability to increase the seed productivity of different varieties under different growing conditions by 23-56%, other strains - by 3-32%. It was found that the productivity of variety microbial systems is mainly determined by the strain of nodule bacteria (the effect of inoculation was

60-62%). No relationship between the yield of the aboveground biomass and its crude protein content was found. The correlation coefficients obtained in the different field experiments were  $-0.41 \pm 0.34$  to  $0.26 \pm 0.39$ . Pre-sowing inoculation with highly active rhizobia strains of alfalfa variegated seeds of Selena, Agnia, Taisia, created using the methods of conjugate symbiotic breeding, increased the yield in the year of sowing by 26-35% in dry matter and by 44-56% in seeds. The yield of Vega 87, Lugovaya 67, Pastbishnaya 88, and Nakhodka varieties created by traditional methods increased by 3-20% in dry matter and by 23-29% in seeds. Pre-sowing inoculation with active rhizobia strains of alfalfa cultivars created by symbiotic breeding methods increased the yield in the first year of use by 46-128% in plots where alfalfa was not grown before and by 32-35% in the crop rotation with high alfalfa crop saturation.

**Keywords:** alfalfa, strains, nodule bacteria, symbiosis, conjugate breeding, yield

**Для цитирования:** Степанова Г.В. Результаты симбиотической селекции люцерны // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2023. Т. 53. № 1. С. 14–22. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-1-2>

**For citation:** Stepanova G.V. Results of symbiotic breeding of alfalfa. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2023, vol. 53, no. 1, pp. 14–22. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-1-2>

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

С 1990 г. во Всероссийском научно-исследовательском институте кормов им. В.Р. Вильямса начался новый этап селекции люцерны: создание сортов нового поколения, способных обеспечить устойчиво высокие сборы сухого вещества и семян за счет использования возобновляемых ресурсов люцерно-ризобиального симбиоза. Начало этих исследований стало результатом теоретических и экспериментальных работ ряда отечественных и зарубежных ученых<sup>1–5</sup>. С учетом этих работ во ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса предложен «Способ селекции люцерны»<sup>6</sup>. Затем этот способ был оптимизирован и разработан «Биотехнология сопряженной симбиотической селекции» [1]. С использованием новых способов селекции созданы сорта люцерны Селена (2007 г.), Агния (2012 г.), Таисия (2015 г.), обладающие высокой азот-

фиксирующей способностью, урожайностью и адаптивностью за счет использования возобновляемых ресурсов растительно-микробного симбиоза. Сорта такого типа необходимы для создания экологически устойчивых агрофитоценозов, высокая продуктивность которых достигается при минимальном использовании агрохимикатов [2, 3].

Исследования с использованием изотопа <sup>15</sup>N показали, что высоко комплементарные растительно-микробные системы способны в полевых условиях накопить 140–210 кг/га связанного азота за сезон. Коэффициент симбиотической азотфиксации достигает 0,88, средняя прибавка урожайности – 25% [4]. Повысить урожайность сортов за счет растительно-микробного симбиоза можно, используя предпосевную инокуляцию азотфиксирующими биопрепаратами. Например, в Томской области сбор сена люцерны увеличился

<sup>1</sup>Barnes D.K., Heichel G.H., Vance C.P. A multiple-trait breeding program for improving the symbiosis for N<sub>2</sub> fixation between *Medicago sativa* L. and *Rhizobium meliloti* // Plant and Soil. 1984. Vol. 82. P. 303–312.

<sup>2</sup>Phillips D.A., Teuber L.R. Plant genetics of symbiotic nitrogen fixation // Biological Nitrogen Fixation. New York, 1992. P. 625–647.

<sup>3</sup>Provorov N.A., Simarov B.V. Genetic variation of alfalfa, sweet clover and fenugreek for the activity of symbiosis with *Rhizobium meliloti* // Plant Breeding. 1990. Vol. 105. P. 300–310.

<sup>4</sup>Provorov N.A., Saimnazarov U.B., Tanriverdiev T.A., Simarov B.V. The contributions of plant and bacterial genotypes in the growth and nitrogen accumulation of inoculated alfalfa // Plant and soil. 1994. Vol. 164. P. 213–219.

<sup>5</sup>Provorov N.A. Relationship between symbiotic and combined nitrogen assimilation in leguminous plants: genetic and breeding aspects // Russian Journal of Plant Physiology. 1996. T. 43. N 1. С. 111–118.

<sup>6</sup>Пат. 2077190 С1 Способ селекции люцерны (Российская Федерация) / Г.В. Степанова; заявл. 25.07.94; опубл. 20.04.97; Бюл. № 11.

на 1,2 т/га [5]. В Московской и Ленинградской областях предпосевная инокуляция разных сортов люцерны штаммами ризобий А5, А6, А8 повысила урожайность на 27–36% по сухому веществу и на 7–109% по семенам [6, 7]. В системе Географической сети по оценке биопрепаратов во Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной микробиологии (Санкт-Петербург) проанализирована урожайность 73 люцерно-ризобиальных пар. Установлено, что инокуляция активными штаммами ризобий повышала урожайность сортов, созданных традиционными методами, на 6–84%, созданных методами сопряженной симбиотической селекции, – на 33–198% [8].

Высокая эффективность симбиоза отмечена при выращивании бобовой культуры на новых почвах [9], а также при высокой «специфичности взаимодействия партнеров» [5]. Добиться высокой «специфичности партнеров» можно только сопряженной селекцией растений и микроорганизмов. Микроорганизмы, активно взаимодействуя с растением, оптимизируют эндогенный гормональный баланс растений, азотное и фосфорное питание, активизируют механизмы системной устойчивости к стрессам. Возрастает устойчивость к засолению и закислению почвы, температурному шоку и фитопатогенам [9, 10].

Цель исследования – сравнить эффективность симбиоза сортов люцерны, созданных разными способами, и выявить некоторые особенности растительно-ризобиальных взаимодействий.

Задачи исследования:

- изучить эффективность симбиоза сортов люцерны изменчивой, созданных традиционными методами селекции, с активными штаммами ризобий при выращивании в различных почвенных условиях;
- выявить влияние инокуляции на накопление сухого вещества и азота (протеина);
- разработать метод сопряженной симбиотической селекции и с его использованием создать сорта люцерны изменчивой.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Полевые опыты проводили на опытном поле ВНИИК им. В.Р. Вильямса, расположенном в 30 км севернее Москвы. Почва опытных участков дерновоподзолистая среднесуглинистая, pH солевой вытяжки 4,99–5,91, содержание гумуса по Тюрину 1,62–2,10%, общего азота 0,161–0,174%, подвижного фосфора 194,9–289,3 мг/кг почвы, обменного калия 107,7–184,1 мг/кг. В работе использовали сорта люцерны изменчивой (*Medicago varia*, Mart.) селекции ВНИИК им. В.Р. Вильямса, созданные традиционными методами селекции: Вега 87, Лада, Пастбищная 88, Находка, а также Селена, Агния, Таисия, созданные с использованием способов сопряженной симбиотической селекции, и препараты (ризоторфин) штаммов клубеньковых бактерий (*Sinorhizobium meliloti*), созданных во Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной микробиологии (Санкт-Петербург). Всего изучено 33 штамма. Кроме того, в качестве контроля использовали штамм СХМ 48, имеющий мутацию  $Nod^+ fix^-$ , которая блокирует симбиотическую азотфиксацию и переводит растение люцерны на питание азотом почвы. Посев сплошной рядовой, площадь делянок 4 м<sup>2</sup> (контрольные питомники), 10 м<sup>2</sup> (конкурсное сортоиспытание), повторность четырехкратная. Перед посевом семена люцерны опудривали биопрепаратом из расчета 400 г препарата клубеньковых бактерий на 1 га посева. Расход препарата составил 10 г на 100 г семян. Контроль – вариант без инокуляции. Наблюдения, учеты, статистическая обработка проведены по общепринятым методикам<sup>7–9</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За 7 лет исследований (1990–1997) подобраны штаммы к сортам Пастбищная 88 (СХМ 4156), Лада, Вега 87 и Луговая 67 (СХМ 4126), Находка (Т 482). На среднекислой (pH 4,5–5,0) и сильнокислой (pH 4,1–4,4) почве лучшие результаты со всеми сорта-

<sup>7</sup>Методические указания по селекции многолетних трав. М.: ВНИИ кормов, 1985. 190 с.

<sup>8</sup>Селекция люцерны на повышение эффективности симбиоза с клубеньковыми бактериями: метод. реком. СПб.: ВНИИСХМ, 1990. 50 с.

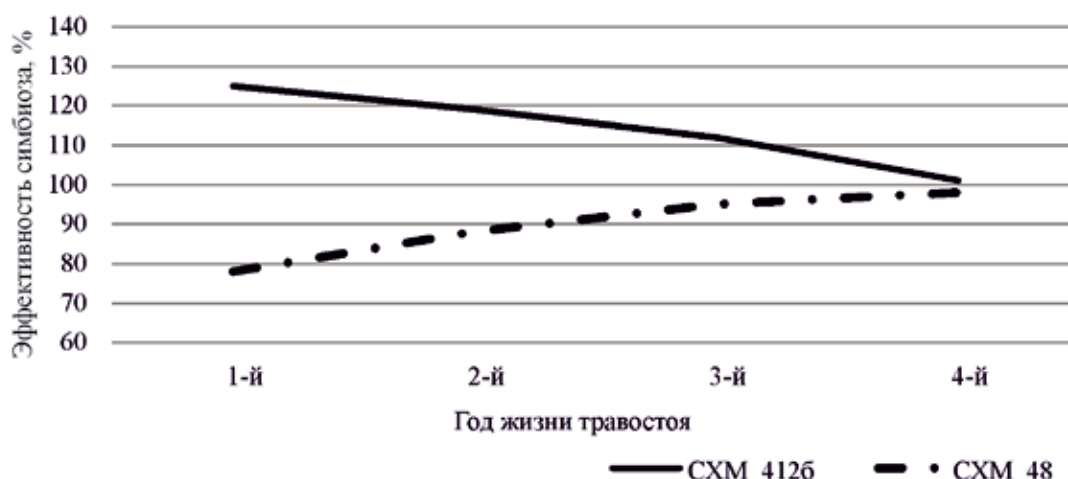
<sup>9</sup>Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1973. 335 с.

ми обеспечил штамм СХМ 4046. Штамм СХМ 4126 имел преимущество на слабнокислой и близкой к нейтральной почве (рН 5,1–6,0). Урожайность сортов Вега 87, Лада, Пастбищная 88, Луговая 67, Находка, инокулированных штаммом СХМ 4126, в год посева была в среднем на 25% выше, чем в варианте без инокуляции (см. рис. 1).

В последующие годы жизни растений сорто-микробных систем средняя урожайность снижалась до 119, 112% и к 4-му году жизни сравнивалась (101%) с урожайностью варианта без инокуляции. Зеркальным отражением выглядит на графике линия изменения эффективности симбиоза пяти названных выше сортов, инокулированных мутантным штаммом СХМ 48. В год посева средняя урожайность оказалась на 22% ниже варианта без инокуляции. Объясняется это тем, что штамм СХМ 48 отличается высокой конкурентной способностью, быстро формирует на корнях люцерны многочисленные мелкие неактивные клубеньки (ген *Nod*<sup>+</sup>), которые не фиксируют азот воздуха (ген *fix*<sup>-</sup>). Люцерна переходит на питание минеральным азотом почвы, и средняя урожайность снижается до 78% к уровню контроля. На 2-й год жизни она возрастает до 88%, на 3-й – до 95 и 4-й – до 98% к уровню контроля (см. рис. 1). Причина – образование вторичного симбиотического

комплекса растений люцерны с клубеньковыми бактериями, живущими в почве. После каждого скашивания растений или их ухода в период зимнего покоя клубеньки на корнях люцерны отмирают, бактерии переходят в почву. После возобновления роста растений образуются новые клубеньки, их формируют наиболее генетически близкие растениям люцерны расы (штаммы) клубеньковых бактерий. Чаще всего это местные расы бактерий, в присутствии которых создавался сорт. В результате уровень симбиотической азотфиксации и урожайности сорто-микробных систем через один-два года жизни травостоя выравнивается с вариантом без инокуляции. Если инокулянт обладает высокой конкурентной способностью и генетической комплементарностью растению-хозяину, при образовании вторичного симбиотического аппарата этот штамм из раза в раз станет формировать высокоэффективные симбиотические системы. Снижение урожайности будет замедленным. По-видимому, к такой категории относится штамм СХМ 4126, снижение средней урожайности пяти сорто-микробных систем до уровня варианта без инокуляции продолжалось 4 года (см. рис. 1).

Вторым важным вопросом является влияние предпосевной инокуляции на содержание сырого протеина в сухом веществе люцерны.



**Рис. 1.** Динамика средней эффективности симбиоза пяти сортов люцерны (закладка опытов 1991, 1992, 1993 гг., среднее за 1991–1996 гг.)

**Fig. 1.** Dynamics of the average efficiency of symbiosis of five alfalfa varieties (sowing years 1991, 1992, 1993, average 1991–1996)

Рассмотрим это на примере сортов Пастбищная 88 (Rhizome × Syn 7008) и Находка (Syn 7008 × Rhizome). Исследования проводили на участке, где люцерну выращивают более 50 лет. Влияние инокуляции было слабо выраженным. Только 8 из 13 штаммов существенно – на 23–65 г/м<sup>2</sup> (+7–20%) – повысили продуктивность сорта Пастбищная 88 и 4 штамма – на 28–56 г/м<sup>2</sup> (+9–18%) сорта Находка (см. табл. 1).

Среднее содержание сырого протеина в сухом веществе сортов Пастбищная 88 и Находка без инокуляции составило 19,1 и 20,0%, инокуляция увеличила белковость на 0,8 и 0,6% в абсолютном показателе. Существенное увеличение содержания протеина в сухом веществе сорта Пастбищная 88 обеспечили пять штаммов, сорта Находка – четыре. Причем, штамм Т 482 существенно – на 8 и 11% – повысил сбор сухого вещества, на 1,3 и 1,4% – содержание протеина обоих сортов. Штамм СХМ 71 на 12% увеличил сбор сухого вещества и на 1,7% содержание протеина сорта Пастбищная 88. По сорту Находка лучшие показатели (+18 и 1,3%) обеспечил штамм СХМ 425а (см. табл. 1).

Дисперсионный анализ показал, что продуктивность растений люцерны сортов Паст-

бищная 88 и Находка на 60 и 62% определялась вариантом инокуляции. Содержание сырого протеина в сухом веществе растительно-микробных систем с сортом Пастбищная 88 на 42% зависело от варианта инокуляции, сортом Находка – на 28%.

Корреляционно-регрессионный анализ выявил отсутствие связи между накоплением сухого вещества надземной биомассы и содержанием в ней сырого протеина. По сорту Пастбищная 88 коэффициент корреляции ( $r$ ) равнялся  $0,05 \pm 0,29$ , коэффициент существенности  $t_r = 0,18 < t_{05} = 2,45$ . По сорту Находка:  $r = 0,18 \pm 0,28$ ;  $t_r = 0,64 < t_{05} = 2,45$ .

Несколько другие результаты получены при определении зависимости содержания сырого протеина от продуктивности растительно-микробных систем, сформированных штаммами с эффективностью симбиоза 7% и выше. Таких оказалась восемь по каждому сорту. Средняя продуктивность лучших растительно-микробных систем с сортом Пастбищная 88 достигла 362 г/м<sup>2</sup>, на 18 г/м<sup>2</sup> больше, среднее содержание сырого протеина 19,88%, на 0,03% меньше;  $r = -0,34 \pm 0,38$ ;  $b_{yx} = -0,01$ ;  $t_r = -0,90 < t_{05} = 2,45$ . Прослеживается тенденция понижения содержания сырого протеина в среднем на 0,01% в абсо-

**Табл. 1.** Продуктивность и содержание сырого протеина; первый цикл пользования в год посева, начало цветения (среднее за 1991 и 1993 гг.)

**Table 1.** Productivity and crude protein content; the first cycle of use in the year of sowing, the beginning of flowering (the average of 1991 and 1993)

| Вариант инокуляции | Сухое вещество, г/м <sup>2</sup> |         | Сырой протеин, % |         |
|--------------------|----------------------------------|---------|------------------|---------|
|                    | Пастбищная 88                    | Находка | Пастбищная 88    | Находка |
| СХМ 226            | 347*                             | 324     | 19,7             | 21,0*   |
| СХМ 4126           | 342                              | 295     | 20,2*            | 20,7    |
| СХМ 214            | 349*                             | 312     | 19,7             | 20,2    |
| СХМ 126            | 382*                             | 331     | 19,6             | 19,8    |
| СХМ 239            | 336                              | 347*    | 19,5             | 20,2    |
| СХМ 3              | 389*                             | 319     | 19,4             | 21,0*   |
| СХМ 425а           | 351*                             | 359*    | 19,7             | 21,3*   |
| Т 482              | 350*                             | 335*    | 20,4*            | 21,4*   |
| Т 798              | 339                              | 333*    | 20,7*            | 20,5    |
| СХМ 105            | 341                              | 300     | 20,4*            | 20,6    |
| СХМ 71             | 362*                             | 293     | 20,8*            | 20,9*   |
| Среднее значение   | 344                              | 322     | 19,9             | 20,6    |
| Контроль           | 324                              | 303     | 19,1             | 20,0    |
| НСР <sub>05</sub>  | 23                               | 24      | 1,0              | 0,8     |

\*Статистически существенно,  $p \leq 0,05$ .

лютном показателе при повышении продуктивности растительно-микробной системы на 1 г сухого вещества/м<sup>2</sup>. По сорту Находка средняя продуктивность восьми растительно-микробных систем была 335 г/м<sup>2</sup> (+13 г/м<sup>2</sup>). Среднее содержание сырого протеина (20,66%) увеличилось на 0,06%. Отмечено незначительное повышение содержания сырого протеина при возрастании продуктивности;  $r = 0,26 \pm 0,39$ ;  $b_{yx} = 0,01$ ;  $t_r = 0,65$ ;  $t_{05} = 2,45$ . Следовательно, предпосевная инокуляция разных сортов люцерны препаратами активных штаммов клубеньковых бактерий по-разному влияет на урожайность и содержание сырого протеина в сухом веществе этих сортов. Для каждого сорта можно подобрать препараты клубеньковых бактерий, повышающие урожайность и белковость или один из этих признаков. Недостатком таких сорто-микробных систем является относительно низкая генетическая комплементарность макро- и микросимбионта и, как следствие, быстрое повторное заселение корней люцерны малоактивными местными расами клубеньковых бактерий.

По-видимому, чтобы реализовать возможность управлять метаболизмом растительно-микробных систем и использовать возобновляемые ресурсы люцерно-ризобиального симбиоза, необходимо создавать сорта и генетически близкие им штаммы клубеньковых бактерий, обеспечивающие высокую эффективность симбиоза в течение трех лет и более. Одним из таких сортов является

Селена. В табл. 2 показана динамика продуктивности надземной биомассы растительно-микробных систем сорта Селена по годам пользования. В год посева проведен один укос в фазу полного цветения. Все растительно-микробные пары (исключение инокуляция штаммом СХМ 425а) были существенно – на 0,5–0,9 кг/м<sup>2</sup> (+14–26%) – урожайнее варианта без инокуляции. На 2-й год жизни травостоя за три укоса собрали 1,70–2,08 кг сухого вещества/м<sup>2</sup>.

Инокуляция штаммами СХМ 4156, СХМ 4046, СХМ 4126 и Т 4 существенно – на 16–22% – повысила урожайность по сравнению с контролем. Вегетационный период 2002 г. был жарким и засушливым, гидротермический коэффициент составил 0,62 (норма 1,58). Проведен один укос в фазу начала цветения. Растительно-микробные системы со штаммами СХМ 4126, СХМ 4156 и СХМ 4046 оказались на 11–18% урожайнее сорта Селена без инокуляции (см. табл. 2).

Инокуляция активными штаммами снизила содержание сырого протеина до 20,00–21,38% (исключение сорто-микробные системы со штаммами СХМ 4156 и Т 2 (23,0 и 24,06%)). Выявлена отрицательная зависимость между урожайностью растительно-микробных систем и содержанием сырого протеина:  $r = -0,41 \pm 0,34$ ;  $b_{yx} = -7,6$ ;  $t_r = 1,18$ ;  $t_{05} = 2,37$ . Исключение – штамм СХМ 4156, который обеспечил повышение урожайности по годам жизни на 26, 16 и 13%, содержание сырого протеина на 3-й год жизни составило 23,0%.

**Табл. 2.** Эффективность симбиоза люцерно-ризобиальных систем сорта Селена. Посев 2000 г.

**Table 2.** Efficiency of symbiosis of alfalfa-rhizobial systems of the Selen variety. Sowing in the year 2000.

| Вариант инокуляции | Сухое вещество, кг/м <sup>2</sup> |         |                      | Сырой протеин, %<br>(1-й укос 2002 г.) | Семена, г/м <sup>2</sup> |
|--------------------|-----------------------------------|---------|----------------------|----------------------------------------|--------------------------|
|                    | 2000 г.                           | 2001 г. | 2002 г.** (1-й укос) |                                        |                          |
| СХМ 4126           | 0,40*                             | 2,06*   | 0,88*                | 20,56                                  | 11,2*                    |
| СХМ 425а           | 0,39                              | 1,85    | 0,86                 | 20,31                                  | 10,0                     |
| СХМ 4046           | 0,41*                             | 2,03*   | 0,93*                | 20,94                                  | 12,2*                    |
| Т 8                | 0,43*                             | 1,87    | 0,79                 | 20,00                                  | 9,4                      |
| Т 4                | 0,41*                             | 2,08*   | 0,78                 | 21,38                                  | 10,5                     |
| СХМ 4156           | 0,44*                             | 1,98*   | 0,89*                | 23,00                                  | 9,3                      |
| Т 2                | 0,42*                             | 1,89    | 0,75                 | 24,06                                  | 9,7                      |
| Контроль           | 0,35                              | 1,70    | 0,79                 | 22,38                                  | 8,5                      |
| НСР <sub>05</sub>  | 0,05                              | 0,21    | 0,08                 |                                        | 2,5                      |

\*Статистически существенно,  $p \leq 0,05$ .

\*\*2002 г. – из-за продолжительной засухи (с 22.06 по 17.09.2002) получен один полноценный укос зеленой массы.

В 2003 г. травостой люцерны использовали для получения семян. Погодные условия были неблагоприятными, сбор семян оказался небольшим: от 8,5 до 12,2 г/м<sup>2</sup>. Инокуляция штаммами СХМ 4126 и СХМ 4046 повысила сбор семян на 31 и 44% (см. табл. 2). Таким образом, можно рекомендовать предпосевную инокуляцию сорта Селена штаммом СХМ 4156 для получения сухого вещества с высоким содержанием протеина, семян – штаммом СХМ 4046.

Следующим этапом развития сопряженной симбиотической селекции стала разработка метода, названного «Биотехнология сопряженной селекции сортов с высокой адаптивной способностью». С использованием этого метода созданы и включены в Государственный реестр селекционных достижений сорта люцерны изменчивой Агния (2012 г.), Таисия (2015 г.). В сортоиспытании с 2021 г. находится сорт Агния ВИК. Новая «Биотехнология» позволяет сократить селекционный процесс на 5–7 лет и обеспечивает создание сортов (сорто-микробных систем), обладающих высокой симбиотической азотфиксацией, урожайностью и адаптивной способностью.

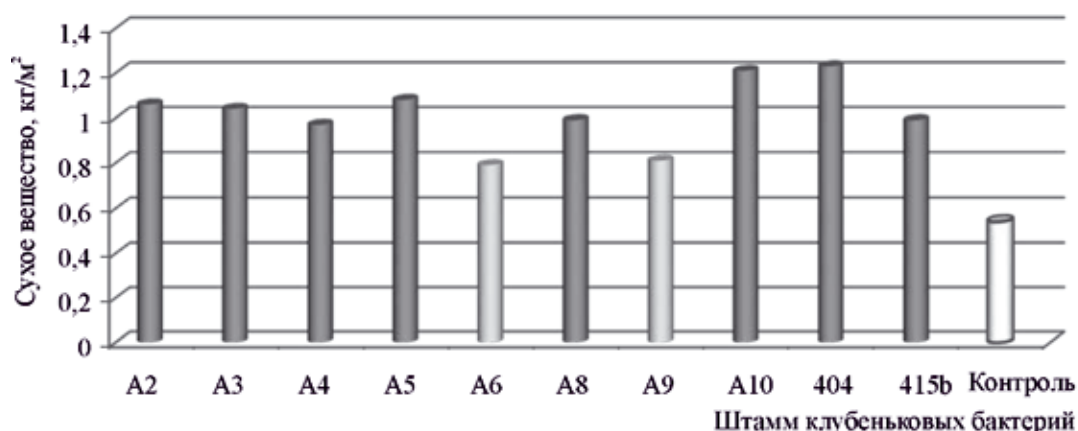
Суть метода: на специальном селективном фоне проводят отбор родительских растений с очень высокой адаптивной способностью, скрещивают между собой отобранные расте-

ния, формируют сорта с заданными свойствами из полученных гибридов.

Сорт Агния формировали на средне-окультуренной почве (рН 5,0–5,8) при инокуляции штаммами СХМ 4126, СХМ 4156, СХМ 425а. В результате получился сорт с высокой отзывчивостью на инокуляцию штаммами СХМ 4126 и СХМ 4156. Прибавка продуктивности надземной биомассы достигала 30–40% и выше, семян – 40–60% и выше по сравнению с выращиванием без инокуляции. В популяции сорта преобладают цветки с сиреневой окраской.

Сорт Таисия формировали на кислой почве (рН 3,9–4,5) при инокуляции штаммом СХМ 4046. Сорт отличается высокой устойчивостью к избыточному увлажнению в период вегетации и покоя, а также возделыванию на кислой почве (рН 4,4 и выше). В популяции преобладают цветки с пестрой окраской.

На рис. 2 показана продуктивность растительно-ризобийных систем сорта Таисия в первый год пользования травостоем. Испытание сорта проводили на участке с кислой почвой, где прежде люцерну не выращивали. Для демонстрации возможностей нового сорта выбрали первый год пользования, во-первых, потому, что в год посева и первый год пользования наиболее эффективно действие инокулянтов, во-вторых, в этот период молодые растения люцерны наиболее



**Рис. 2.** Продуктивность люцерно-ризобийных систем сорта Таисия; возделывание на кислой почве (рН 4,36). Данные 2018 г., посев 2017 г.

**Fig. 2.** Productivity of alfalfa-rhizobial systems of Taisia variety, cultivation on acidic soil (рН 4.36). Data 2018, seeding 2017

чувствительны к негативному действию почвенной кислотности.

В первый год пользования получили 0,54 кг сухого вещества/м<sup>2</sup> в контроле и 0,79–1,23 кг/м<sup>2</sup> в вариантах с предпосевной инокуляцией 10 штаммами ризобий. Растительно-микробные системы со штаммами А6 и А9 были существенно – на 0,25–0,27 кг/м<sup>2</sup> (НСР<sub>05</sub> = 0,24 кг/м<sup>2</sup>) – урожайнее сорта Таисия без инокуляции. Остальные штаммы высоко существенно – на 0,43–0,69 кг/м<sup>2</sup> (НСР<sub>01</sub> = 0,34 кг/м<sup>2</sup>) – увеличили сбор сухого вещества. Наиболее урожайными оказались сорто-микробные системы со штаммами А10 и СХМ 4046. Прибавка составила 0,67 и 0,69 кг/м<sup>2</sup> (+124 и 128%) (см. рис. 2).

Хозяйственную ценность сортов люцерны, созданных разными способами, испытывали в питомнике посева 2018 г. Люцерну на этом участке периодически выращивают, начиная с 1975 г. В почве имеются местные расы клубеньковых бактерий, поэтому высоких прибавок урожайности от инокуляции не отмечено. В варианте без инокуляции средняя за 3 года пользования (2019–2021) урожайность сортов Агния и Таисия была 10,0 и 10,3 т сухого вещества/га, сортов Вега 87, Луговая 67 – лишь 8,0 и 8,9 т/га. Инокуляция штаммом СХМ 4046 повысила урожайность сортов первой группы до 13,2 и 13,9 т/га (+32 и 35%), второй – до 9,1 и 9,2 т/га (+14 и 3%).

Семенная продуктивность – один из адаптивных признаков растений: чем больше растение производит семян, тем выше способность этого генотипа к выживанию и расширению ареала произрастания. В контроле средняя за 2 года пользования (2019 и 2020) урожайность сортов Агния и Таисия составляла 85,3 и 82,8 кг/га, сортов Вега 87 и Луговая 67 – 48,2 и 59,1 кг/га. Инокуляция штаммом СХМ 4046 повысила сбор семян двух первых сортов до 132,9 и 119,4 кг/га (+56 и 44%), вторых – до 59,2 и 76,3 кг/га (+23 и 29%).

## ВЫВОДЫ

1. Продуктивность сорто-микробных систем в основном определяется штаммом клубеньковых бактерий (влияние инокуляции 60–62%). При выращивании люцерны на слабокислой и близкой к нейтральной поч-

ве (рН 5,1–6,0) лучшие результаты обеспечивает предпосевная инокуляция штаммом СХМ 4126, на сильно- и среднекислой почве (рН 4,1–5,0) – штаммом СХМ 4046, при выращивании люцерны на семена – штаммом СХМ 4046.

2. Не выявлено связи между урожайностью надземной биомассы и содержанием в ней сырого протеина: коэффициенты корреляции, полученные в разных полевых опытах, составили  $-0,41 \pm 0,34$  –  $0,26 \pm 0,39$ .

3. Эффективность симбиоза сортов люцерны, созданных методами симбиотической селекции, с активными штаммами ризобий составила 26–35% по сухому веществу и 44–56% по семенам, созданных традиционными методами – лишь 3–20 и 23–29% соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова Г.В. Сорт люцерны изменчивой Таисия // Адаптивное кормопроизводство. 2020. № 2. С. 21–32. DOI: 10.33814/AFP-2222-5366-2020-2-21-32.
2. Provorov N.A., Shtark O.Yu., Dolgikh E.A. Evolution of nitrogen-fixing symbioses on the basis of bacterial migration from mycorrhizal fungi and soil into plant tissue // Biology Bulletin Reviews. 2017. T. 7. N 5. P. 355–368.
3. Косолапов В.М., Чернявских В.И., Костенко С.И. Новые сорта кормовых культур и технологии для сельского хозяйства России // Кормопроизводство. 2021. № 6. С. 22–26. DOI: 10.25685/KRM.2021.89.77.001.
4. Provorov N., Tikhonovich I. Symbiogenetics underway: from genetic analysis to genetic synthesis // Biological Communications. 2021. Vol. 66. N 1. P. 3–5. DOI: 10.21638/spbu03.2021.101.
5. Степанов А.Ф., Александрова С.Н., Храмов С.Ю. Азотфиксирующая способность и урожайность многолетних бобовых трав в подтаежной зоне Западной Сибири // Вестник Омского ГАУ. 2019. № 1 (33). С. 46–53.
6. Косолапов В.М., Пилипко С.В. Основные методы и результаты селекции многолетних трав // Кормопроизводство. 2018. № 2. С. 23–26.
7. Юрков А.П., Лактионов Ю.В., Кожемяков А.П. Анализ симбиотической эффективности бактериальных и грибных препаратов на кормовых культурах по данным урожайности семян // Кормопроизводство. 2017. № 3. С. 16–19.



8. Roumiantseva M.L., Vladimirova M.E., Muntyan V.S., Stepanova G.V., Saksaganskaya A.S., Kozhemyakov A.P., Orlova A.G., Becker A., Simarov B.V. Highly effective root nodule inoculants of alfalfa (*Medicago varia* L.): molecular-genetic analysis and practical usage in cultivar creation // *Agricultural Biology*. 2019. Vol. 54. N 6. P. 1306–1323. DOI: 10.15389/agrobiol.2019.6.1306eng.
9. Тихонович И.А., Иванова Е.А., Першина С.В., Андронов Е.Е. Метагеномные технологии выявления генетических ресурсов микроорганизмов // *Вестник Российской академии наук*. 2017. Т. 87. № 4. С. 337–341. DOI: 10.7868/S0869587317040089.
10. Belimov A.A., Dodd I.C., Safronova V.I., Tikhonovich I.A., Davies W.J. The cadmium tolerant pea (*Pisum sativum* L.) mutant SGECDt is more sensitive to mercury: assessing plant-water relations // *Journal of Experimental Botany*. 2015. Vol. 66. N 8. P. 2359–2369.
5. Stepanov A.F., Aleksandrova S.N., Khramov S. Yu. Nitrogen-fixing capacity and productivity of long-term bean herbs in Subtaiga zone of Western Siberia. *Vestnik Omskogo GAU = Vestnik of Omsk SAU*, 2019, no. 1 (33), pp. 46–53. (In Russian).
6. Kosolapov V.M., Pilipko S.V. Principal methods and results in breeding of perennial grasses. *Kormoproizvodstvo = Fodder production*, 2018, no. 2, pp. 23–26. (In Russian).
7. Yurkov A.P., Laktionov Yu.V., Kozhemyakov A.P. Symbiotic efficiency of bacterial and fungal preparations. *Kormoproizvodstvo = Fodder production*, 2017, no. 3, pp. 16–19. (In Russian).
8. Roumiantseva M.L., Vladimirova M.E., Muntyan V.S., Stepanova G.V., Saksaganskaya A.S., Kozhemyakov A.P., Orlova A.G., Becker A., Simarov B.V. Highly effective root nodule inoculants of alfalfa (*Medicago varia* L.): molecular-genetic analysis and practical usage in cultivar creation. *Agricultural Biology*, 2019, vol. 54, no. 6, pp. 1306–1323. DOI: 10.15389/agrobiol.2019.6.1306eng.
9. Tikhonovich I.A., Ivanova E.A., Pershina S.V., Andronov E.E. Metagenomic technologies of detecting genetic resources of microorganisms. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 87, no. 4, pp. 337–341. (In Russian). DOI: 10.7868/S0869587317040089.
10. Belimov A.A., Dodd I.C., Safronova V.I., Tikhonovich I.A., Davies W.J. The cadmium tolerant pea (*Pisum sativum* L.) mutant SGECDt is more sensitive to mercury: assessing plant-water relations. *Journal of Experimental Botany*, 2015, vol. 66, no. 8, pp. 2359–2369.

## REFERENCES

1. Stepanova G.V. Variety of variable alfalfa Taisia. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo = Adaptive fodder production*, 2020, no. 2, pp. 21–32. (In Russian). DOI: 10.33814/AFP-2222-5366-2020-2-21-32.
2. Provorov N.A., Shtark O.Yu., Dolgikh E.A. Evolution of nitrogen-fixing symbioses on the basis of bacterial migration from mycorrhizal fungi and soil into plant tissue. *Biology Bulletin Reviews*, 2017, vol. 7, no. 5, pp. 355–368.
3. Kosolapov V.M., Chernyavskikh V.I., Kostenko S.I. New varieties of forage crops and technologies for Russian agriculture. *Kormoproizvodstvo = Fodder production*, 2021, no. 6, pp. 22–26. (In Russian). DOI: 10.25685/KRM.2021.89.77.001.
4. Provorov N., Tikhonovich I. Symbiogenetics underway: from genetic analysis to genetic synthe-

## AUTHOR INFORMATION

✉ **Galina V. Stepanova**, Candidate of Science in Agriculture, Lead Researcher; **address:** Building 1, Nauchnyi gorodok, Lobnya, Moscow Region, 141055, Russia; e-mail: gvstep@yandex.ru

Дата поступления статьи / Received by the editors 25.10.2022  
 Дата принятия к публикации / Accepted for publication 21.12.2022  
 Дата публикации / Published 20.02.2023

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

✉ **Степанова Г.В.**, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник; **адрес для переписки:** Россия, 141055, Московская область, г. Лобня, Научный городок, корпус 1; e-mail: gvstep@yandex.ru