

Биологическая фиксация азота соей: обзор

И.А. Чиаппитти и Ф. Сальваджиотти

Для того, чтобы определить пределы удовлетворения потребностей сои в азоте за счет биологической фиксации азота (БФА) был выполнен обзор 60-ти работ по данной тематике. Этот обзор подтвердил, что потребности растений в азоте могут удовлетворяться за счет БФА при потреблении вплоть до 200 кг N/га. Разность между количеством поглощенного и фиксированного растениями азота («недостающий» азот) быстро нарастает при превышении потребности сои уровня в 370 кг N/га, что при высоком потенциале урожайности предполагает необходимость дополнительного поступления азота в растения из других источников. Хозяйственный баланс азота (разность между фиксированным растениями и отчуждаемым с семенами количеством азота) в среднем был отрицательным, но становился нулевым или положительным, если за счет БФА удовлетворялось по крайней мере 58 % потребности растений в азоте.

Соя – один из наиболее важных источников белка и масла в мире. Повышение урожайности сои исторически происходило за счет прироста биомассы и повышения уборочного индекса¹, что требует больших количеств азота (Valboa и др., 2018), поступающего за счет БФА и (или) из почвы. Относительный вклад БФА в азотное питание сои находится в диапазоне 0-98 % и зависит от многих факторов, наиболее важный из которых – азотфиксирующая активность клубеньков. В более раннем обзоре средний вклад БФА в азотное питание сои был подтвержден на уровне 50-60 % (Salvagiotti и др., 2008). В данный диапазон укладываются величины, зарегистрированные недавно в Аргентине (60 % согласно Collino и др., 2015), однако на менее плодородных почвах Бразилии были получены значения вплоть до 80 % (Alves и др., 2003).

Главный вопрос, ставший мотивацией для данного обзора: «Может ли в высокопродуктивных агроценозах сои (с урожайностью семян > 7 т/га) поступать достаточное количество азота за счет БФА и поддерживаться нулевой хозяйственный баланс азота?» В наш обзор вошло 733 наблюдения из 60-ти исследований, проведенных в 1955-2017 гг., включая данные по урожайности семян (исходя из влажности 13 %), БФА и поглощению азота растениями. Хозяйственный баланс азота определялся следующим образом:

Хозяйственный баланс N = Фиксированный N надземной биомассы – Отчуждаемый с семенами N.

Отрицательный хозяйственный баланс азота свидетельствует о том, что количество азота, отчуждаемое с семенами, превышает количество фиксированного растениями азота. Таким образом, происходит «азотное истощение» почвы, что может повлиять на биологический баланс данного элемента питания в агроценозе.

1 Уборочный индекс – отношение массы семян к общей надземной массе растений (а.с.в.) (примечание переводчика)

Урожайность семян, поглощение азота и фиксация N₂ растениями

Урожайность семян сои составила в среднем 3.1 т/га, а максимальная величина была равной 8.3 т/га (рис. 1). Поглощение азота растениями составило в среднем 245 кг N/га, а максимальное значение было близким к 560 кг N/га. Угол наклона центральной линии регрессии на рис. 1 свидетельствует о том, что для получения 1 т семян требовалось поступление в растения в среднем 81 кг азота. Однако, наблюдается четырехкратная разница между граничными значениями потребности в азоте для получения 1 т семян – от приблизительно 53 кг N/т (максимальное «разбавление» – верхняя граничная линия) до 204 кг N/т (максимальное накопление – нижняя граничная линия).

Фиксация N₂ составила в среднем 137 кг N/га, а максимальная величина была равной 372 кг N/га

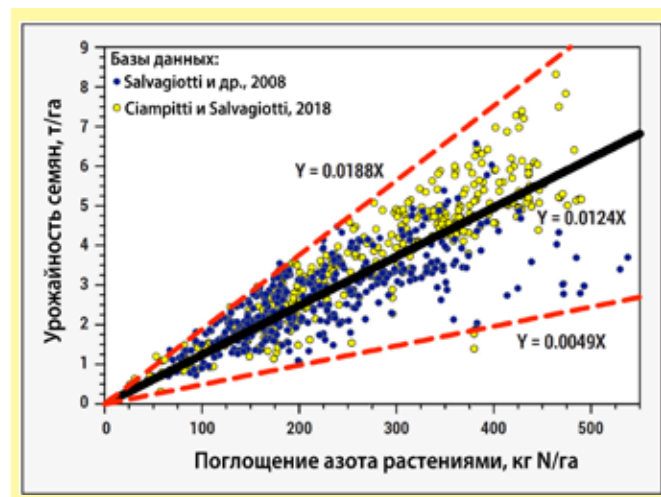


Рис. 1. Зависимость между урожайностью семян и поглощением азота растениями сои по результатам исследований, проведенных в 1955-2017 гг.

Синие точки соответствуют базе данных, представленной в более раннем обзоре Сальваджиотти с соавт. (Salvagiotti и др., 2008), а желтые – новой базе данных, собранной Чиаппитти и Сальваджиотти (Ciampitti и Salvagiotti, 2018).

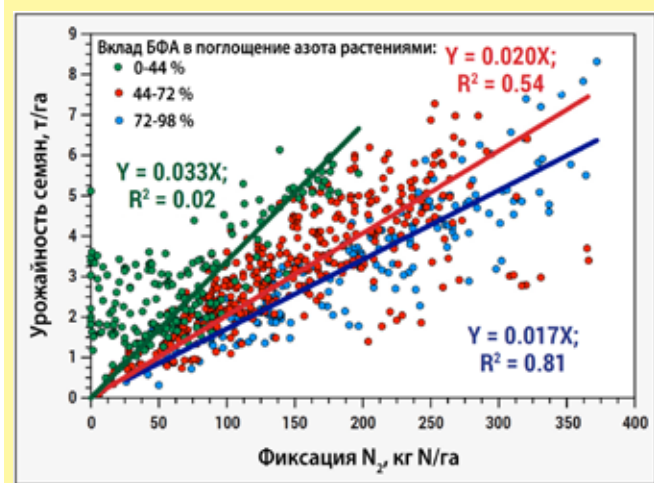


Рис. 2. Зависимость между урожайностью семян и фиксацией N_2 растениями сои по результатам исследований, проведенных в 1955-2017 гг.

Группы данных с разным относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями: 0-44 % (зеленые точки), 44-72 % (красные точки) и 72-98 % (синие точки).

БФА - биологическая фиксация азота.

(рис. 2). Относительный вклад фиксации N_2 в поглощение азота растениями составил в среднем 56 %, и половина данных располагалась в диапазоне 44-72 %.

Урожайность семян и фиксация N_2 были линейно связаны с относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями (рис. 2). В группе данных с низким относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями (зеленые точки: вклад БФА менее 44 %) урожайность семян была ниже. Данная группа соответствует агроценозам сои с большей зависимостью от поступления азота из почвы (или удобрения) для удовлетворения потребностей растений в данном элементе питания. В группе данных с высоким относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями (синие точки: вклад БФА более 72 %) фиксировалось в среднем 59 кг N/т семян или примерно в два раза больше по сравнению с вышеуказанной группой. При этом в группе данных с высоким относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями максимальная урожайность семян была выше 7 т/га, а фиксация N_2 – более 300 кг N/га.

Фиксация N_2 и потребность растений в азоте: «недостающее» количество азота

Для установления количества так называемого «недостающего» азота, под которым понимается часть потребляемого соей азота, поступающая не за счет БФА, была изучена зависимость между фиксацией N_2 и поглощением азота растениями. Медианная линия (50-й процентиль), показанная на рис. 3, свидетельствует о том, что с ростом потребности растений в азоте его «недостающее» количество возрастает линейно. Линия для максимальной БФА (99-й процентиль) указывает на максимальную фиксацию N_2 для каждого уровня поглощения азота растениями. Полученная в данном случае квадратичная модель свиде-

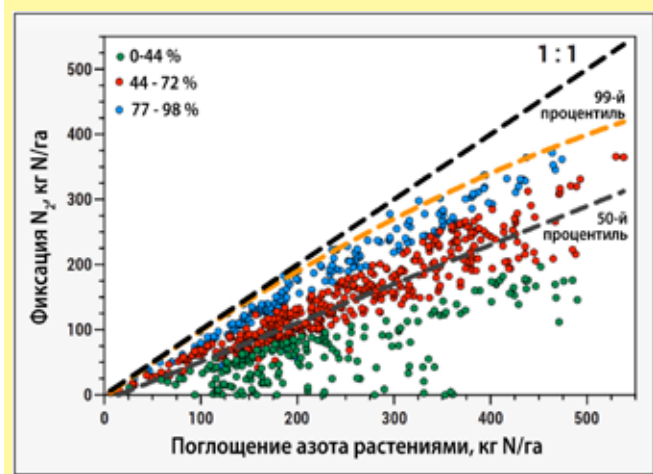


Рис. 3. Зависимость между фиксацией N_2 и поглощением азота растениями сои.

Группы данных с разным относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями: 0-44 % (зеленые точки), 44-72 % (красные точки) и 72-98 % (синие точки).

Количество «недостающего» азота – разность между количеством поглощенного и фиксированного растениями азота.

БФА – биологическая фиксация азота.

тельствует о том, что с ростом потребности растений максимальная способность к обеспечению азотом за счет БФА снижается не линейно, а более быстро. До уровня потребления 200 кг N/га наблюдается достаточная синхронность между максимальным поступлением азота за счет БФА и потребностью растений; затем – до уровня потребления 370 кг N/га «недостающее» количество азота возрастает с постоянной скоростью, а далее – более быстро. Например, при поглощении растениями 330 кг N/га «недостающее» количество азота составляет 38 кг N/га, но при достижении уровня поглощения 400 кг N/га «недостающее» количество азота возрастает до 60 кг N/га (рис. 3). Данные результаты предполагают, что в высокопродуктивных агроценозах более высокое поглощение азота растениями может обеспечиваться не только за счет БФА, но и за счет других источников.

Хозяйственный баланс азота и накопление азота в почве после сои

Хозяйственный баланс азота (без учета вклада корневых систем в БФА) составил в среднем -47 кг N/га, и при этом 50 % данных находилось в диапазоне от -75 до -11 кг N/га. В группе данных с низким относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями его хозяйственный баланс составил в среднем -100 кг N/га при средней урожайности семян 2.9 т/га и количестве фиксированного N_2 , равном 62.5 кг N/га. В группе данных с высоким относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями его хозяйственный баланс составил в среднем -3.4 кг N/га при средней урожайности семян 3.6 т/га и количестве фиксированного N_2 , равном 202 кг N/га.

Значения кумулятивных частот для величины хозяйственного баланса азота (рис. 4) свидетельствуют о том, что в группе данных с низким относитель-

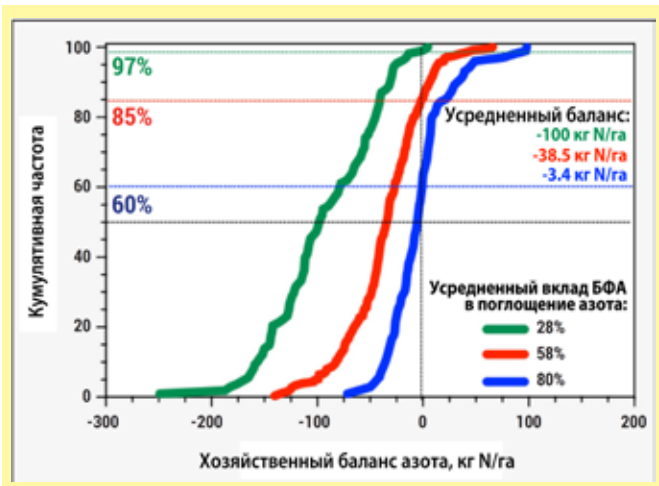
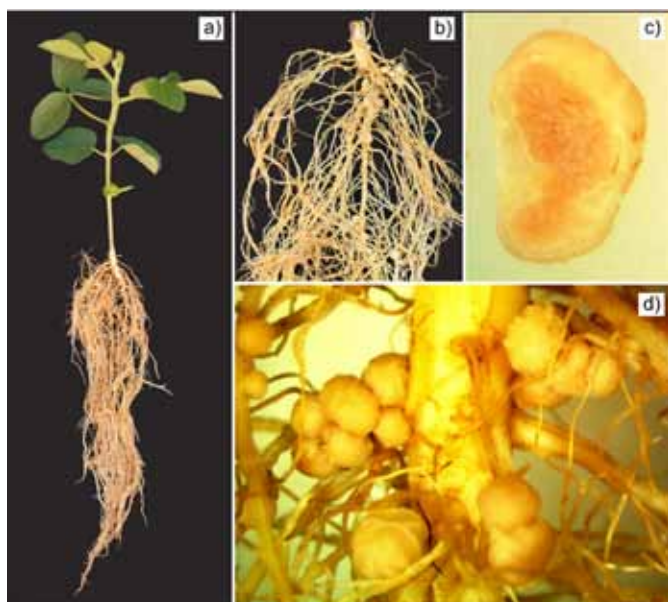


Рис. 4. Кумулятивная функция распределения величины хозяйственного баланса азота в агроценозах сои. Группы данных с разным относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями: 0-44 % (зеленая линия), 44-72 % (красная линия) и 72-98 % (синяя линия).

БФА – биологическая фиксация азота.



Растение сои в фазу трех тройчатых листьев (V3), выращенное в вегетационном павильоне без внесения минерального азота. Семена обрабатывались инокулянтом, содержащим штамм *Bradyrhizobium japonicum*. Показана корневая система с клубеньками (b и d) и начинающий фиксировать азот клубень, о чем свидетельствует его соответствующая внутренняя окраска (c).

ным вкладом БФА в поглощение азота растениями положительный баланс наблюдался только для 3 % данных ($n = 4$). При этом в группе с высоким относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями положительный баланс наблюдался для 40 % данных ($n = 41$).

В будущем определение хозяйственного баланса азота должно учитывать потенциальное количество азота в опадающих листьях, а также вклад корневых систем, включая поступление азота из более тонких корней, которые не учитываются при удалении из почвы видимых корней. Настоящий обзор, очевидно, будет способствовать большему сосредоточению усилий на сборе данных относительно вклада корневых систем с целью получения более точной количественной оценки влияния БФА на хозяйственный баланс азота.

И последнее, накопление азота в почве после сои или «эффект севооборота с соей» обычно используется в рекомендациях по применению азотных удобрений в севообороте кукуруза – соя в США, и при этом целиком и полностью исходят из минерализации растительных остатков сои с узким соотношением C:N (Bundy и др., 1993; Gentry и др., 2001 и 2013). Согласно настоящему обзору, хозяйственный баланс азота может быть положительным благодаря БФА, но вероятность этого выше при относительном вкладе БФА в поглощение азота растениями более 70 %, когда фиксация N_2 превышает отчуждение азота с урожаем семян сои. Однако, также возможно и отсутствие накопления азота в почве после сои, когда относительный вклад БФА в поглощение азота растениями ниже 42 %.

И последнее, накопление азота в почве после сои или «эффект севооборота с соей» обычно используется в рекомендациях по применению азотных удобрений в севообороте кукуруза – соя в США, и при этом целиком и полностью исходят из минерализации растительных остатков сои с узким соотношением C:N (Bundy и др., 1993; Gentry и др., 2001 и 2013). Согласно настоящему обзору, хозяйственный баланс азота может быть положительным благодаря БФА, но вероятность этого выше при относительном вкладе БФА в поглощение азота растениями более 70 %, когда фиксация N_2 превышает отчуждение азота с урожаем семян сои. Однако, также возможно и отсутствие накопления азота в почве после сои, когда относительный вклад БФА в поглощение азота растениями ниже 42 %.

Выводы

В среднем в агроценозах сои относительный вклад БФА в поглощение азота растениями находится между 50-60 % с максимальными значениями при потреблении до 200 кг N/га. Выше уровня потребления в 370 кг N/га «недостающее» количество азота (разность между количеством поглощенного и фиксированного растениями азота) увеличивается сильнее, что при высоком потенциале урожайности требует поступления в растения дополнительного количества азота из других источников. Хозяйственный баланс азота, определенный без учета вклада корневых систем в БФА, был отрицательным при разных уровнях БФА, но приближался к нулевому при относительном вкладе БФА в поглощение азота растениями выше 70 %.

Для повышения отдачи от БФА будущие исследования должны быть направлены на выявление высокоэффективных штаммов из рода *Rhizobium*, адаптированных к агроценозам с высокой потребностью растений в азоте и (или) способных ослабить негативное влияние содержания нитратного азота в почве на БФА. Приоритетные направления исследований в мире в высокоурожайных агроценозах сои (с урожайностью семян > 7 т/га) – изучение вклада корневых систем в БФА, а также минерализации азота и протекающих в растениях процессов, оказывающих наибольшее влияние на БФА.

Практическая значимость

Уровень БФА, наблюдаемый в группах данных с низким и средним относительным вкладом БФА в поглощение азота растениями (< 72 %), не должен использоваться для установления количества накопленного в почве азота после сои в севообороте кукуруза – соя.

Уведомление

Данная публикация – сокращенная версия науч-

ной статьи «Новые представления о биологической фиксации азота соей», опубликованной И.А. Чиампитти и Ф. Сальваджиотти в *Агрономическом журнале* (*Agronomy Journal*): номер за июль/август 2018 г. doi:10.2134/agronj2017.06.0348.

Д-р Чиампитти – адъюнкт-профессор и специалист по системам земледелия Университета штата Канзас (США); e-mail: ciampitti@ksu.edu.

Д-р Сальваджиотти – агроном-исследователь Национального института сельскохозяйственной технологии (INTA), г. Оливерос (Аргентина); e-mail: salvagiotti.fernando@inta.gob.ar.

Литература

- Alves, B.J.R., et al. 2003. *Plant Soil* 252:1. doi:10.1023/A:1024191913296.
Balboa, G.R., et al. 2018. *Crop Sci.* 0. doi:10.2135/cropsci2017.06.0349.
Bundy, L.G., et al. 1993. *Agron. J.* 85:1061-1067. doi:10.2134/agronj1993.00021962008500050020x.
Collino, D.J., et al. 2015. *Plant Soil* 392:239-252. doi:10.1007/s11104-015-2459-8.
Gentry L.E., et al. 2001. *Plant Soil* 236:175-184.
Gentry, L.E., et al. 2013. *Agron. J.* 105:1658-1664.
Salvagiotti, F., et al. 2008. *F. Crop. Res.* 108:1-13. doi:10.1016/j.fcr.2008.03.001.

Перевод с английского и адаптация: В.В. Носов.

Признаки дефицита элементов питания у сои

Фосфор



Сравниваются две делянки опыта: вариант с внесением 120 кг P_2O_5 /га (слева) и вариант без внесения фосфорных удобрений (справа). При дефиците фосфора наблюдался замедленный рост растений сои – высота растений и размер листьев были меньше. Авторы: Luiz Antonia Zanao Junior

Калий



Недостаток калия у сои
Автор: Tiago Aranda Catuchi



Недостаток калия у сои
Автор: C.C. Mitchell