

УДК 631.461.1-5

© 2008

С. Я. Коць, доктор биологических наук

Институт физиологии растений и генетики НАН Украины

Н. В. Патыка, кандидат сельскохозяйственных наук

Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии РАСХН

В. Ф. Патыка, доктор биологических наук

Институт микробиологии и вирусологии им. Д. К. Заболотного НАН Украины

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ АЗОТА В ПОЧВАХ

Рассматриваются современные данные об основных звеньях микробиологической трансформации азота – биологическая азотфиксация, нитрификация, денитрификация, аммонификация и их роль в повышении продуктивности агроэкосистем и получении экологически чистого белка.

Деятельность микроорганизмов почв привела к скачкообразному усложнению микроразнообразия и появлению в почвенном профиле множества микролокусов с резко различающимися физико-химическими условиями, что в итоге способствовало существенному расширению горизонтов био-разнообразия. Известно также, что биологическая продуктивность наземных и водных экосистем и биосферы в целом в значительной степени зависит от источников доступного азота. По существующим представлениям, главным из них является микробная азотфиксация, обеспечивающая не только сиюминутную потребность организмов, но и резервирование азота в виде различных азотсодержащих соединений. Азотфиксация, появившаяся у самых первых живых организмов (бактерий и архей), практически одновременно с возникновением на Земле жизни, приобрела по мере ее распространения на планете глобальные масштабы, а связанный при этом азот стал играть ключевую роль в биосфере. Микробная азотфиксация активно протекает в самых разнообразных локусах (микрокосмах) с широким сочетанием физико-химических условий (почвы разных типов, речная

и морская вода, илы, ризосфера и филлосфера растений, желудочно-кишечный тракт животных и т.д.), в итоге способствуя поддержанию динамического равновесия концентраций различных соединений азота в природе. Особенно велика роль почвенных микроорганизмов в формировании и поддержании биогеохимического цикла азота, и прежде всего за счет его биологической фиксации [11].

В ходе эволюции продукты былых биосфер в виде разнообразных органических остатков – каустобиолитов и керогенов (угля, нефти, сапропеля, торфа, гумуса) – постепенно становились разнообразнее, а их общее количество возрастало. Одновременно возрастало и количество запасенного в их составе азота, поступившего, главным образом, в результате деятельности бактерий-азотфиксаторов и трансформированного в разнообразные азотсодержащие соединения, отличающиеся не только по составу, но и по времени нахождения в природной среде [6].

Азот среди биогенных элементов выделяется высокой подвижностью всех природных соединений и большой скоростью метаболизма, чем объясняется отсутствие заметных его скоплений в природе (в виде минералов и агрономических руд) и в составе запасных веществ живой клетки [8].

Наиболее длительным сроком сохранения выделяется азот органического вещества почв, в основном почвенного гумуса, являющегося главным резервуаром «биологического» азота в биосфере. Только почвы обладают способностью к запасанию (иммобилизации) связанного в ходе азотфиксации азота и играют роль единственного в биосфере долговременного депо этого элемента [11].

Однако этот азот с трудом поддается минерализации и не может служить легкодоступным источником для большинства организмов, вследствие чего они реализуют другие способы его пополнения, главными из которых по распространенности являются симбиозы и ассоциации с бактериями-дiazотрофами [5,8,10,11].

Вторым важнейшим микробиологическим звеном в глобальном круговороте азота является нитрификация. Осуществляется она двумя принципиально разными группами микроорганизмов. К первой относятся таксономически и физиологически однородные высокоспециализированные в отношении окисляемого субстрата бактерии, проводящие автотрофную нитрификацию; ко второй – таксономически и физиологически разнообразные бактерии и грибы, осуществляющие гетеротрофную нитрификацию.

Длительное время считалось, что ведущая роль в глобальном процессе окисления аммония до нитрита и далее до нитрата принадлежит автотрофной нитрификации, а деятельность гетеротрофных нитрификаторов даже не рассматривалась. В последние годы, благодаря появлению новых методов изучения нитрификации в природной среде, эти взгляды пересматриваются. Согласно полученным данным, гетеротрофная нитрификация играет важную, нередко ведущую, роль в окислении восстановленных соединений азота во многих почвах и, соответственно, в глобальном его круговороте [4,11].

Довольно распространено мнение, что конечным продуктом нитрификации являются нитраты, которые легко вымываются из почвы и уносятся водой, вследствие чего основное количество связанного азота переносится с суши в океан, оставаясь при этом в неизменном состоянии. Однако в последнее время появляется все больше данных, что значительные потери азота из почв происходят не только в результате выщелачивания нитратов, но и в виде азотсодержащих газов. При нитрификации основным из них является закись азота (N_2O).

Денитрификация – последнее звено в «контролируемом» микроорганизмами биогеохимическом цикле азота, в котором связанный азот вновь превращается в атмосферный (N_2). Как выяснилось в последние годы, при микробной денитрификации наряду с молекулярным азотом (N_2) в большом количестве образуется закись азота (N_2O), которая нередко является основным конечным продуктом процесса [11].

Закись азота, несмотря на относительную химическую инертность, принимает активное участие в парниковом эффекте, и растущее ее содержание в атмосфере Земли изменяет тепловой баланс планеты. Кроме того, взаимодействие ее с озоном (O_3) в верхних слоях тропосферы Земли служит одной из главных причин разрушения озонового экрана планеты, защищающего живые объекты от жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Появляется все больше данных, что регистрируемое в настоящее время медленное, но неуклонное снижение биологического разнообразия на Земле является следствием и этого эффекта [11].

Полученные в последние два десятилетия данные о роли микробного населения почвы в глобальных циклах азота (и углерода) позволили по-новому подойти к объяснению причин изменения климата на Земле. Предполагается, что оно может быть следствием протекающего в настоящее время широкомасштабного процесса ухудшения свойств почв, которое сопровождается быстрой потерей ими запасов органического вещества и проявляется в нарушении существующего динамического равно-

весия в глобальном балансе не только углерода, но и азота – уменьшении его запасов в почве и увеличении (главным образом, в виде закиси азота) в атмосфере [11].

Поддерживавшееся длительное время динамическое равновесие в содержании разных форм азота в биосфере, которое регистрировалось главным образом по количеству нитратов в почве и воде и концентрации закиси азота в атмосфере, примерно 50 лет назад стало меняться. Наблюдаемое в настоящее время увеличение содержания нитратов и N_2O обусловлено комплексом причин, объединяемых обычно общим термином «деградация почв», приводящих к ускоренной минерализации органического вещества почв – дегумификации. Мониторинг динамики органического вещества почв, который ведется почти 200 лет (в настоящее время координируется международной программой Global Change And Terrestrial Ecosystems), не оставляет сомнений в ускорении этого процесса. Органическое вещество почв и его важнейшая часть – почвенный гумус – накапливались в течение длительного времени (от нескольких сотен до тысяч лет) и отражают историю почвообразования на Земле. Содержание гумуса и прочих органических соединений быстро снижается при самых разнообразных воздействиях на почву: внесении удобрений, известковании, загрязнении почв кислотными дождями, тяжелыми металлами и многими иными веществами. Гумус быстро реагирует также на осушение и орошение почв, вспашку и рыхление, причем, как правило, его содержание при этом уменьшается [1,11].

«Биологический» азот, длительное время сохранявшийся в составе гумуса, в ходе дегумификации переходит в другие соединения, превращаясь в итоге в закись азота и молекулярный азот, причем на соотношение между этими газами влияет также комплекс факторов природной среды, и таким образом, изменение условий природной среды достаточно быстро отражается на биогеохимическом цикле азота в биосфере. В свою очередь, изменение (увеличение) скорости круговорота азота (и углерода) проявляется на климате Земли – чем выше средняя температура атмосферы, тем быстрее происходят иссушение почв и потеря ими органического вещества. Взаимосвязанность и взаимообусловленность свойств почв и климата на Земле – важнейшие проблемы современного фундаментального почвоведения [8,11].

Несмотря на важность, масштабы и интенсивность процессов азотного цикла в биосфере Земли до настоящего времени изучены слабо, а роль почв в образовании и поглощении азотсодержащих газов остается

невыясненной, хотя именно азот во многом определяет способность почв поддерживать продуктивность наземных экосистем.

Несмотря на то, что состояние экосистем суши и, соответственно, стабильность биосферы напрямую зависят от содержания и скорости трансформации азота в почвах, исследование особенностей поведения азота в наземных экосистемах осуществляется лишь фрагментарно.

За счет микробной азотфиксации был создан и ныне поддерживается азотный статус всех природных экосистем и биосферы в целом. Как отмечалось, современная цивилизация, несмотря на большие успехи в производстве минеральных азотных удобрений, потребности в азоте более чем на 2/3 продолжает покрывать за счет «биологического» азота. Расширение масштабов использования «биологического» азота позволит снизить энергетические затраты в земледелии и уменьшить техногенные нагрузки на природную среду [2,3, 9, 11].

Роль азота в качестве одного из основных химических носителей свойств живой материи известна достаточно хорошо. Известны также общая направленность круговорота азота в природе и особенности его звеньев – азотфиксации, аммонификации, нитрификации и денитрификации [11].

С превращениями азота в природе связаны такие важнейшие проблемы современной биологии, как сохранение биологического разнообразия и устойчивое развитие биосферы Земли [12].

В еще более тесной связи с круговоротом азота находится проблема обеспечения человечества пищевым белком (связанным азотом), недостаток которого существовал во все эпохи цивилизации и сохраняется в настоящее время. Согласно имеющимся оценкам, мировое растениеводство ежегодно выносит с урожаем из почвы примерно 110-120 млн. т азота, тогда как вносится на поля около 80 млн. т в виде минеральных азотных удобрений и 30 млн. т в составе органических удобрений. С учетом коэффициента усвоения азота растениями (не более 50% для минеральных удобрений и 30% для органических) из этих источников в мировой урожай поступает в среднем около 40-45 млн. т азота, или около 1/3 его выноса [8, 11].

Современное производство азотных удобрений обеспечивает не более 1/3 суммарной потребности мирового растениеводства в этом элементе, и, соответственно, основное его количество сельскохозяйственные растения получают из азотного резерва почв, созданного и поддерживаемого деятельностью микроорганизмов-азотфиксаторов [1,4,12].

Азотфиксирующие бактерии (дiazотрофы), единственные из всего населения планеты, ассимилируют атмосферный азот (N_2) и обеспечивают этим элементом не только себя, но и все другие организмы, вследствие чего процесс фиксации атмосферного азота играет ведущую, ключевую роль в балансе азота не только в природе, но и на полях. Азотфиксация являлась основным источником доступного азота для всех живых существ в биосфере во все периоды ее развития, хотя на долю одновременно присутствующего «биологического» азота приходится лишь ничтожная часть (около 0,0007%) общих его запасов на Земле [11].

В природных экосистемах азот, как биофильный элемент, не лимитирует их продуктивность благодаря высокой сбалансированности всех звеньев его биогеохимического цикла, когда приход азота полностью покрывает все расходные статьи, а часть его запасается в составе органического вещества почв. Напротив, в почвах агроэкосистем азот является основным элементом, определяющим их продуктивность, поскольку в них этот цикл не только резко нарушен, но и разорван вследствие частых обработок почвы и непрерывного плодосмена, разрушающих микробные ценозы, ответственные за азотфиксацию. Вместе с регулярным выносом азота с урожаем все это обуславливает его дефицит в пахотных почвах и вызывает необходимость регулярного внесения азотных туков. Отчуждение продукции из агроэкосистем увеличивает дисбаланс между обеспечением сельскохозяйственных растений доступным азотом и его приходом с растительными остатками и отходами переработки урожая. Более того, этот дисбаланс усугубляется тем, что основное потребление азотсодержащих продуктов территориально разобщено с их производством. Как паллиатив служат минеральные азотные удобрения [7, 11].

Интенсивное применение минеральных азотных удобрений (в 10-кратном объеме) и внедрение сортов растений, использующих высокие дозы азота, обеспечило в 1950-1960-е гг. успех «зеленой революции» в растениеводстве, которая, однако, полностью не решила продовольственную проблему в мире. В современном обществе такие технологии обеспечивают сбалансированное по белку (азоту) питание населения индустриально развитых стран, тогда как в развивающихся государствах сохраняется ситуация с хронической нехваткой белков в рационе [4, 11, 13].

Массированное применение азотных удобрений в развитых странах стало причиной широко известных отрицательных эффектов в природе: поступления нитратов в грунтовые воды, ускоренной минерализации органического вещества почв (дегумификации) и обусловленной этим возросшей эмиссии парниковых микрогазов (N_2O , CO_2 , CH_4) из почв. При

этом происходит не только локальное ухудшение качества природной среды, но и наблюдается дисбаланс азотного цикла в глобальном масштабе, что влияет уже на стабильность климата и озонового экрана Земли и проявляется в виде разнообразных нарушений основных функций биосферы [11,13].

Библиографический список

1. Агроекология /Под ред. В. А. Черникова, А. И. Чекереса. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
2. Волкогон В. В. Мікробіологічні аспекти оптимізації азотного удобрення сільськогосподарських культур. – Київ: Аграрна наука, 2007. – 144 с.
3. Завалин А. А. Биопрепараты, удобрения и урожай. М.: Изд-во ВНИИ агрохимии, 2005. – 302 с.
4. Мікроорганізми і альтернативне землеробство /За ред. В. П. Патики. – К.: Урожай, 1993. – 176 с.
5. Мишустин Е. Н., Шильникова В. К. Клубеньковые бактерии и инокуляционный процесс. – М.: Наука, 1973. – 288 с.
6. Нетрусов А. И., Бонч-Осмоловская, Горленко В. М., Иванов М. В., Каравайко Г. И., Колотилова Н. Н., Котова И. Б., Максимов В. Н., Ножевникова А. Н., Семенов А. М., Турова Т. П., Юдина Т. Г. Экология микроорганизмов /Учеб. пособие для вузов под ред. А.И. Нетрусова. – М.: Изд. Центр «Академия», 2004. – 272 с.
7. Патика В. П. Наукова концепція сталого розвитку агросфери України //Агроекологічний журнал. – 2002. – № 2. – С. 10-14.
8. Патика В. П., Коць С. Я. та ін. Біологічний азот: Монографія /За ред. В. П. Патики. – К.: Світ, 2003. – 424 с.
9. Тихонович И. А., Проворов Н. А. (ред). Rhizobiaceae – молекулярная биология бактерий, взаимодействующих с растениями. СПб., 2002. – 567 с.
10. Умаров М. М. Ассоциативная азотфиксация. М.: Изд-во МГУ, 1986. – 136 с.
11. Умаров М. М., Кураков А. В., Степанов А. Л. Микробиологическая трансформация азота в почве. М.: ГЕОС, 2007. – 138 с.
12. Шумный В. К. (ред.) Биологическая фиксация азота. Н.: Наука, 1991. – 145 с.
13. Яцик А. В. Екологічна безпека в Україні. – К.: Генеза, 2001. – 216 с.