

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ПУТЕЙ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА

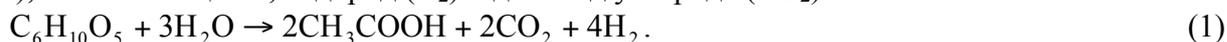
Вавилин В.А.

Институт водных проблем РАН, 119333 Москва, Российская Федерация

vavilin@iwp.ru

Аннотация: динамика фракционирования стабильных изотопов является следствием динамики химических и биологических процессов. Исследованные процессы включали образование метана и его аэробное и анаэробное окисление. Математическое моделирование показало, что динамика перераспределения стабильных изотопов в ходе исследованных химико-биологических процессов позволяет уточнить метаболический путь превращения субстрата и определить соответствующие кинетические параметры.

Метан является вторым наиболее важным парниковым газом, концентрация которого значительно увеличивается в результате деятельности человека, способствуя глобальному потеплению. Основным продуктом ферментативного разложения целлюлозы являются моносахариды, которые в дальнейшем трансформируются в летучие жирные кислоты (ЛЖК), такие как ацетат, водород (H₂) и диоксид углерода (CO₂):



Основными субстратами для метаногенных микроорганизмов являются ацетат и водород/диоксид углерода, соответственно:



Традиционно считается (Conrad, 2005), что вклад ацетокластического метаногенеза составляет около 70% общей продукции метана. Однако относительный вклад различных ацетокластических и гидрогенотрофных метаногенных микроорганизмов в образование метана может определяться факторами окружающей среды и составом микроорганизмов. Так, доминирующим механизмом метанообразования может быть процесс, при котором ацетат предварительно окисляется до H₂ и H₂CO₃:



Эта реакция, осуществляемая ацетат-окисляющими микроорганизмами, происходит синтрофно с водородотрофными метаногенами, трансформирующими H₂ и H₂CO₃ в CH₄.

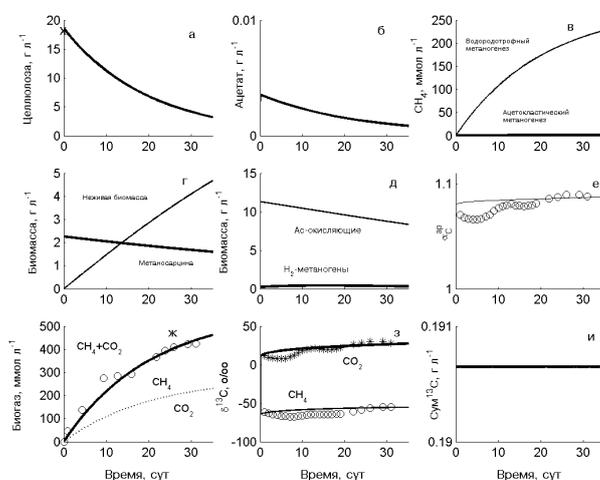


Рисунок 1 – Превращение целлюлозы в метан при высокой концентрации биомассы ацетат-окисляющих бактерий. Экспериментальные данные (Laukenmann et al., 2010), кривые: математическая модель (Vavilin, Rytov, 2017)

Количественное описание микробного окисления метана является существенным для оценки цикла метана в биосфере и понимания роли метана в глобальном потеплении. Если не рассматривать процесс фракционирования изотопов в ходе микробиологического окисления метана, отношения изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в газовой и жидкой фазах будут сильно отличаться, что противоречит экспериментальным данным (Кнох et al., 1992). Учет фракционирования изотопов углерода в ходе микробиологического окисления метана позволяет получить одинаковые отношения изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в газовой и жидкой фазах. Кроме того, моделирование, как и экспериментальные данные, показали, что величина факторов фракционирования α_{C} и α_{H} зависит как от вида метанотрофных бактерий, так и от содержания меди в растворе, влияющей на скорость ферментативных процессов. Таким образом, фракционирование изотопов углерода и водорода происходит именно в процессе микробного окисления растворенного метана.

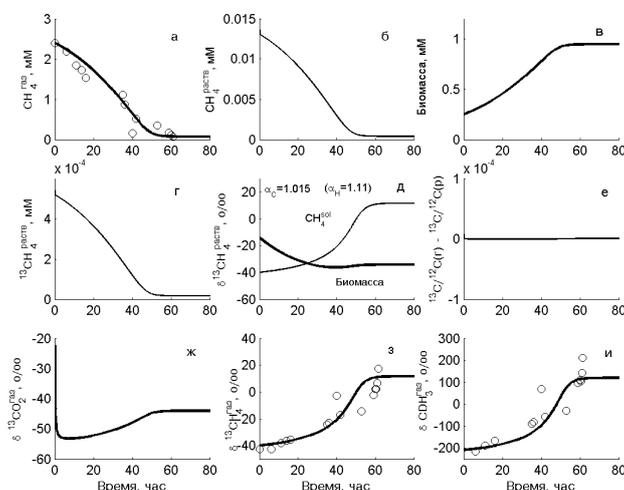


Рисунок 2 – Рибулезно-монофосфатный путь окисления метана (*Methylocaldium gracile*).
Символы: эксперимент (Feisthauer et al., 2011); кривые: математическая модель (Vavilin et al., 2016).

Работа поддержана Российским Научным Фондом (проект № 17-17-01204).

Литература

- Conrad R. Quantification of methanogenic pathways using stable carbon isotopic signatures: a review and a proposal. // Organ. Geochem. 2005. V. 36. P. 739–752.
- Feisthauer S., Vogt C., Modrzynski J., Szelkier M., Krüger M., Siegert M., Richnow H.H. Different types of methane monooxygenases produce similar carbon and hydrogen isotope fractionation patterns during methane oxidation. // Geochim. Cosmochim. Acta 2011. V. 75. P. 1173-1184.
- Knox M., Quay P.D., Wilbur D. J. Kinetic isotopic fractionation during air-water gas transfer of O_2 , N_2 , CH_4 , and H_2 . // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 20335-20343.
- Laukenmann S., Polag D., Heuwinkel H., Creule M., Gronauer A., Lelievre J., Keppler F. Identification of methanogenic pathway in anaerobic digesters using stable carbon isotopes // Eng. Life Sci. 2010. V. 10. P. 1-6.
- Vavilin V.A., Rytov S.V., Shim N., Vogt C. Non-linear dynamics of stable carbon and hydrogen isotope signatures based on a biological kinetic model of aerobic enzymatic methane oxidation // IEHS 2016. V. 52, P. 185-202.
- Vavilin V.A., Rytov S.V. Dynamic changes of apparent fractionation factor to describe transition to syntrophic acetate oxidation during cellulose and acetate methanization // IEHS 2017. V. 53, 135-156.