

# БИОЛОГИЯ

УДК 574.5

*Л. И. Инишева, С. Г. Катаев, А. Е. Иваницкий, Л. И. Дубровская, А. В. Фатеев*

## ОЦЕНКА БИОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА

В работе проведен анализ закономерностей распределения отдельных групп микроорганизмов в олиготрофных торфяных болотах Западной Сибири с применением кластерно-аналитического метода. Выявлены связи между свойствами, режимами олиготрофных торфяных болот и активностью биохимических процессов.

**Ключевые слова:** торфяное болото, торфообразование, биохимические процессы, микрофлора, кластерный анализ.

Проблема функционирования и рационального использования торфяно-болотных экосистем относится к важнейшим в учении о биосфере и прогнозировании последствий глобального потепления климата. В условиях роста в атмосфере концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  более ценными считаются те биогеоценозы, которые способны больше взять углекислого газа из атмосферы и дольше удерживать в себе углерод. Таковыми являются торфяные почвы. И хотя на них приходится только 2–4 % поверхности Земли, они рассматриваются как один из основных углеродных пулов биосферы.

Известно, что торфяные почвы на 50–98 % состоят из растений торфообразователей, органическое вещество которых претерпевает сложные преобразования под влиянием биохимических процессов. Это приводит к высвобождению углерода в виде метана и диоксида углерода, а также происходит изменение исходного состава органического вещества, молекулярной структуры его отдельных компонентов и синтез новых продуктов. Задача оценки биохимической деструкции (торфогенеза) органического вещества торфяных почв на основе проведения длительных стационарных исследований составляет важное направление проблемы круговорота углерода в биосфере. Деструкция углеродсодержащих веществ в торфяных почвах представляет собой непрерывный биохимический процесс. Выявление вклада торфяных почв в биосферный круговорот углерода определяется прогнозом торфогенеза. В связи с этим оценка биохимических процессов, протекающих в торфяных почвах, пулов и потоков между составляющими компонентами биогеоценоза, а также с внешней средой – очень важная фундаментальная и практическая задача.

Среди значительного количества работ, посвященных микрофлоре торфяных почв разных регионов, практически отсутствуют исследования по всему почвенному профилю торфяных почв [1, 2].

В основном преобладают данные по содержанию микрофлоры только верхних горизонтов либо отдельных торфов. Полнопрофильные исследования микрофлоры показали, что запасы микробной биомассы не сосредоточены в верхних горизонтах, а в той или иной степени равномерно распределены по всему почвенному профилю до подстилающей породы. Данные исследования важны, поскольку показывают, что биологические процессы протекают не только в верхнем слое торфяной залежи, а по всей ее глубине. Различная активность биохимических процессов, происходящих в торфяных почвах, приводит к различной эмиссии  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Так как торфяные почвы считаются основными источниками поступления парниковых газов в атмосферу, исследование численности микрофлоры, участвующей в трансформации органического вещества торфяных почв и образовании  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  и ее активности по всей мощности торфяной почвы, – одна из актуальнейших проблем современной микробиологии.

Цель данной работы заключается в выявлении закономерностей распределения отдельных групп микроорганизмов в олиготрофных торфяных почвах по вегетационным периодам трех лет исследований с применением кластерно-аналитического метода и изучении его информативности для описания динамики микробиологических процессов.

Основной задачей исследований являлся анализ связей между свойствами, режимами олиготрофных торфяных почв и активностью биохимических процессов.

Исследования проводились на территории научно-исследовательского полигона «Васюгань», расположенного в пределах Бакчарского района Томской области и относящегося по болотному районированию к Западно-Сибирской таежной болотной области бореально-атлантических выпуклых олиготрофных моховых болот активного заболачивания [3]. В качестве модельного объекта при-

нята территория малого заболоченного водосбора р. Ключ (водосборная площадь 58 км<sup>2</sup>), расположенного в северо-западной части Васюганского болота. Ландшафтный профиль, на котором проводились исследования, пересекает следующие основные виды болотных фитоценозов: высокий рям (пункт 2), низкий рям (пункт 3) и осоково-сфагновую топь (пункт 5) [4]. Определение численности микроорганизмов проводилось в соответствии с методиками Института микробиологии РАН [5].

Обработка экспериментальных данных была произведена с использованием метода многомерной статистики – метода выделения структур (МВС), разработанного одним из авторов. Этот метод относится к кластерному анализу, и накопленный опыт применения его при исследовании сложных систем различной природы показал его полезность и работоспособность [6].

Кластерный анализ – это обобщенное название ряда процедур, целью которых является создание классификации, т. е. распределение объектов на небольшое число групп, которые называются кластерами, используя при этом тот или иной принцип схожести. Разбиение объектов на классы предоставляет исследователю дополнительные возможности при анализе результатов, в частности позволяет сравнивать друг с другом не отдельные объекты, а классы или их средних представителей. Кластерные методы используют обычное представление исходных данных в виде таблицы «объект-свойство» (ТОС), в которой каждая строка номера  $i$ , ( $i = 1, \dots, N$ ), относящаяся к  $i$ -му объекту, содержит значения  $M$ -признаков. Совокупность признаков может отражать разные качества объекта или определять динамику какого-то одного параметра, и они могут задаваться в шкалах различной силы. Метод выделения структур фактически является набором процедур, используя которые можно провести разложение данных на структуры, либо выявить в них определенные, заранее заданные структуры. Этот метод относится к группе методов, использующих представление теории графов, и вариант МВС, используемый нами в этой работе, наиболее просто может быть описан именно на этом языке.

Соотнесем с каждым объектом вершину  $x_i$  некоторого графа  $G$ , а стоимости ребра ( $x_i x_j$ ), связывающего вершины  $x_i$  и  $x_j$ , припишем величину, равную расстоянию  $D_{ij}$  между соответствующими объектами в пространстве признаков  $X$ . Если теперь последовательно удалять из графа ребра с большими значениями  $D_{ij}$ , то, начиная с некоторого  $D_p = D_{max}$ , исходный граф станет несвязным. Дальнейшее уменьшение порога  $D_p$  приводит к увеличению числа компонент связности, среди которых будут подграфы с различным числом вершин. Каждую появляющуюся компоненту связ-

ности – выделившийся подграф, мы и будем считать кластером. Любой такой  $k$ -й подграф можно охарактеризовать двумя пороговыми значениями:  $D: D_{max}^k$  – значение порога, при котором этот подграф отделяется от остального графа; и  $D_{min}^k$  – значение порога, при котором из этого подграфа выходит одна вершина или сразу несколько вершин, т. е. эта структура разваливается. Таким образом, величина  $D_{min}^k$  в какой-то степени определяет степень компактности  $k$ -го подграфа; чем меньше эта величина, тем сильнее связь между всеми элементами этого кластера.  $D_{max}^k$  для  $k$ -го кластера показывает, насколько он связан с остальной частью графа, а максимальная величина этого параметра  $D_{max} = \max(D^k)$ ,  $k = 1, N_d$ , т. е. значение порога, при котором из графа выделяется первый подграф, характеризует степень связности всего графа. По разности  $D_{max}^k - D_{min}^k$  можно судить о степени изолированности этой структуры от остальной части графа (своеобразное «время жизни»  $k$ -го кластера).

Расстояния между объектами, нормированные на единицу, можно рассчитывать, используя различные определения. Так, по Евклиду расстояние  $D_{ij}^E$  вычисляется следующим образом:

$$D_{ij}^E = [(x_i^l - x_j^l)^2]^{1/2} / D_{max}$$

а по Хеммингу  $D_{ij}^H$

$$D_{ij}^E = | (x_i^l - x_j^l) | / D_{max}$$

Можно определять и другие метрики, но все они, как правило, будут частным случаем одного и того же класса метрических функций расстояния, известных как метрики Минковского.

После разбиения объектов на классы можно вычислить статистические характеристики исследуемой величины для каждого кластера: среднее значение, дисперсия и т. д. Но, кроме этого, каждому кластеру можно приписать и определенные универсальные (структурные) характеристики: среднее значение длины связи, ее дисперсия, изолированность и компактность кластера, зависящие только от длин связей между элементами.

Это, безусловно, полезно, так как дает возможность количественно сравнивать различные кластеры друг с другом по этим структурным параметрам.

В данной работе в качестве объектов были выбраны конкретные пространственные точки проведения измерений: пункт и глубина взятия проб в конкретный год, а в качестве признаков – результаты измерений изучаемых параметров в мае, июле и сентябре. Таким образом, была сформирована таблица типа «объект-свойство», содержащая 51 объект, а поскольку исследования проводились как для каждого отдельного параметра, так и для всего набора, то ко-

личество признаков варьировалось от 3 до 24. При таком выборе объектов становится возможным сравнивать характер динамики либо отдельно взятого параметра, либо всех сразу на различных площадках.

В качестве объекта кластерного анализа выбиралась триада: пункт наблюдения – год – глубина. Например, объект P2\_01\_M\_(0–25) на оси абсцисс (рис. 2) означает, что значения на графике приведены для пункта наблюдения 2 за май 2001 г. на глубине (0–25).

В результате проведенного анализа были определены взаимосвязи между определенными группами микроорганизмов в разных торфяных почвах ландшафтного профиля. Картина распределения связей между объектами на трех площадках при учете всех параметров приведена на рис. 1. Видно, что только один объект 2-й площадки (2001 г., измерение на глубине (75–100)) связан с объектами 3-й и 5-й площадок. Плохая связь и между показаниями (выделено овалом) 3-й площадки за 2001 г. со всеми остальными. Обособленность площадки 2 наблюдается и для каждого отдельного параметра. Из рис. 1 следует, что по генезису торфяная залежь пунктов 5 и 3 практически идентична, что и предполагалось при анализе общетехнических и химических свойств данных торфяных почв. Таким образом, было получено подтверждение *одновременности протекания торфообразовательного процесса в олиготрофных почвах низкого яма и осоково-сфагновой топи.*

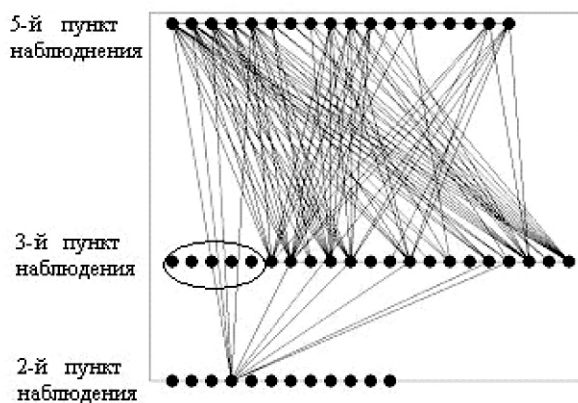


Рис. 1. Взаимосвязь между отдельными группами микроорганизмов в разных торфяных почвах ландшафтного профиля.  
Кружки – объекты, линии – связи между ними

С применением метода выделения структур было проведено сравнение отдельных физиологических групп микрофлоры всех торфяных почв и слоев торфяных почв за отдельные месяцы вегетационного периода. Прежде всего следует отметить, что за все годы исследований выделяется активностью май (рис. 2). В особенности это можно отметить для аэробов, анаэробов, аммонификаторов, микроорганиз-

мов на КАА, денитрификаторов. Активность последних трех групп микроорганизмов не была повторена только в сентябре. По метеоусловиям 2001 г. существенно отличался от других лет периода наблюдений. Сумма температур выше 10 °С за вегетационный период составила 1965 °С, что позволяет считать рассматриваемый год жарким. Особенно выделяется май. При средней многолетней температуре вегетационного периода, равной 8.7 °С, в мае 2001 г. она была равна 14.6 °С. Осадки в 2001 г. составляли 25.1 мм при норме 45.0 мм.

Но в последующие месяцы погодные условия характеризовались как влажные. Если гидротермический коэффициент (ГТК) по Селянинову в мае был равен 0.04, то с июня по сентябрь он принимал значения соответственно 1.55, 1.47, 2.18 и 1.2.

Можно предположить, что засушливые условия в мае обеспечили сохранение активности микрофлоры на протяжении всего вегетационного периода 2001 г.

Представляет интерес рассмотреть активность микрофлоры за отдельные месяцы с позиций подтверждения традиционной закономерности, характерной для торфяных почв. Если считать, что май характеризуется чаще невысокими температурами, и даже при небольших осадках торфяная почва при слабом испарении находится в переувлажненном состоянии, то практически везде на эти условия хорошо отзываются аммонификаторы и микроорганизмы, растущие на КАА, а также аэробные целлюлозоразрушающие микроорганизмы. Наибольшая активность отмечена, как уже указывалось, в 2001 г. В июле такая закономерность отмечена только для аммонификаторов и микроорганизмов, произрастающих на КАА. И только в сентябре отмеченная закономерность частично нарушена нитрификаторами, которые в отдельные годы (2001 г.) проявили активность, сопоставимую с активностью выделяющихся аммонификаторов и микроорганизмов, растущих на КАА.

Таким образом, расчеты, проведенные с применением кластерного анализа, позволили отметить описанные выше закономерности распределения отдельных микроорганизмов в обобщенном виде без выделения глубин и отдельных лет в торфяных почвах исследуемого ландшафтного профиля с использованием большого массива данных.

Расчеты выполнялись по авторской программе С. Г. Катаева.

*Работа выполнена при поддержке грантов Президента (НШ – 3938.2008.5), РФФИ (09–05–00395–а).*

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта № 02.740.11.0325 в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по теме: «Биогеохимические процессы формирования углеродного баланса и образования парниковых газов в болотах Сибири».*

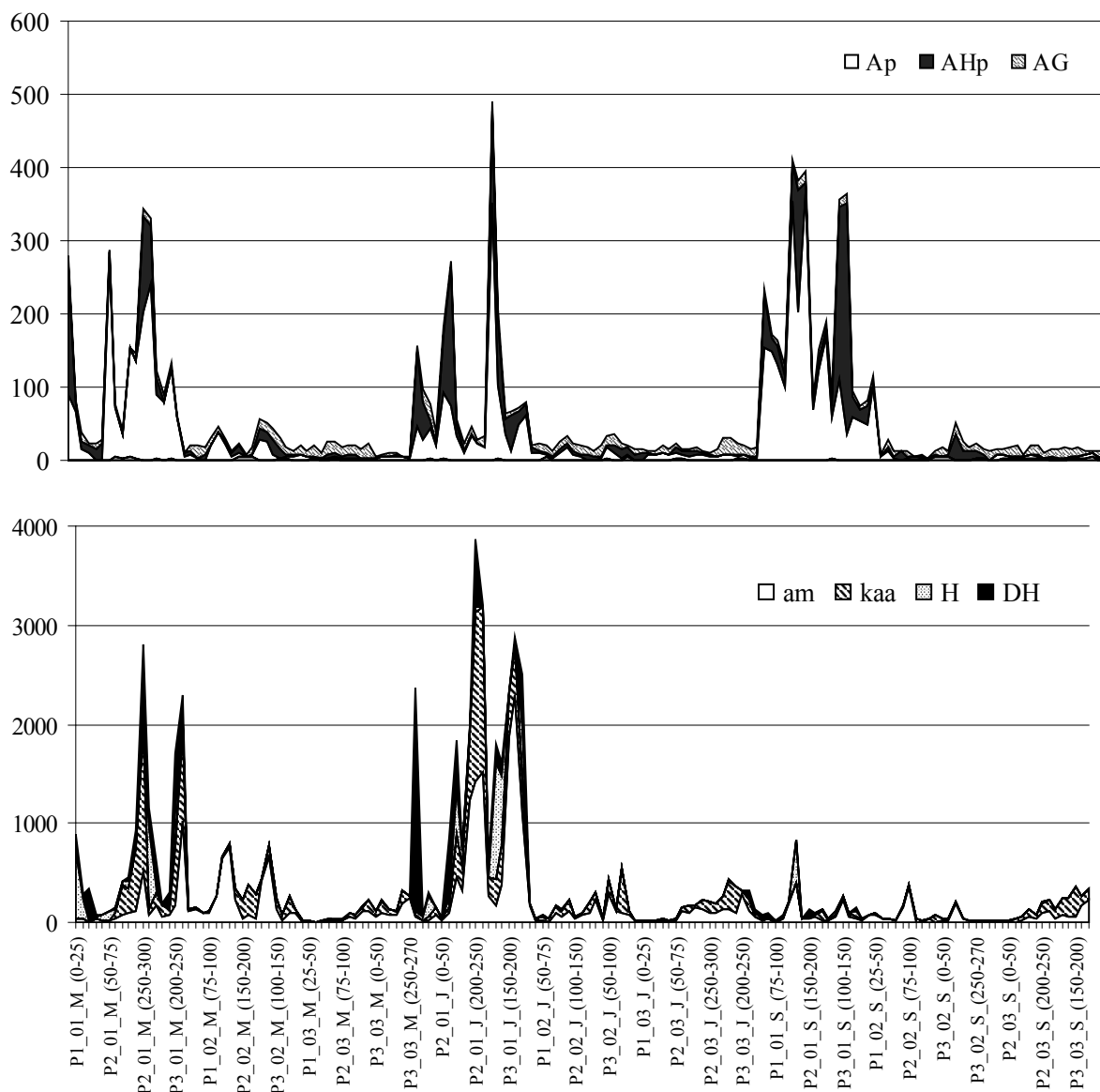


Рис. 2. Динамика различных физиологических групп микроорганизмов всех торфяных почв и их слоев за отдельные месяцы вегетационного периода (2001 – 2003 гг.): ам – аммонификаторы; каа – микроорганизмы, развивающиеся на КАА; Н – нитрификаторы; ДН – денитрификаторы; АГ – гумусоразрушающие; Ар – аэробные целлюлозоразрушающие; АНр – анаэробные целлюлозоразрушающие микроорганизмы. P1, P2, P3 – пункты 1, 2, 3; М – май, J – июль, S – сентябрь; 01 – 2001 г., 02 – 2002 г., 03 – 2003 г. В скобках указаны глубины отбора образцов

### Список литературы

1. Головченко А. В., Полянская Л. М. Сезонная динамика численности и биомассы микроорганизмов по профилю почвы // Почвоведение. 1996. № 10. С. 1227–1233.
2. Головченко А. В. Особенности пространственного распределения и структуры микробных комплексов болотно-лесных экосистем: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1992. 25 с.
3. Лисс О. Л. и др. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и КО, 2001. 584 с.
4. Васюганское болото (природные условия, структура и функционирование) / под ред. Л. И. Инишевой. Томск: ЦНТИ, 2000. 136 с.
5. Методы почвенной микробиологии и биохимии: учеб. пособие / под ред. Д. Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
6. Катаев С. Г., Кусков А. И. Исследование озоновых полей над территорией России и сопредельных государств. II. Классификация составляющих полей озона // Вестн. ТГПУ. 1998. Вып. 5. С. 10–17.

Инишева Л. И., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, чл.-корр. РАСХН.  
**Томский государственный педагогический университет.**  
Ул. Киевская, 60, г. Томск, Томская область, Россия, 634061.  
E-mail: inisheva@mail.ru

Катаев С. Г., доцент.  
**Томский государственный педагогический университет.**  
Ул. Киевская, 60, г. Томск, Томская область, Россия, 634061.  
E-mail: kataev@tomsk.ru

Иваницкий А. Е., кандидат технических наук, доцент.  
**Томский государственный педагогический университет.**  
Ул. Киевская, 60, г. Томск, Томская область, Россия, 634061.  
E-mail: bhf@tspu.edu.ru

Дубровская Л. И., кандидат физико-математических наук, доцент.  
**Томский государственный университет.**  
Пр. Ленина, 36, г. Томск, Томская область, Россия, 634050.  
E-mail: dubrli@mail.ru

Фатеев А. В., кандидат химических наук, доцент.  
**Томский государственный педагогический университет.**  
Ул. Киевская, 60, г. Томск, Томская область, Россия, 634061.  
E-mail: bhf@tspu.edu.ru

*Материал поступил в редакцию 04.05.2009.*

*L. I. Inisheva, S. G. Kataev, A. E. Ivanickiy, L. I. Dubrovskaya, A. V. Fateev*

#### **ESTIMATION OF BIOCHEMICAL ACTIVITY OF MIRE ECOSYSTEMS WITH USING CLUSTER-ANALYTICAL METHOD**

The work makes analysis of the regularities of sharing of the separate groups of microorganisms in oligotrophic mires of West Siberia with using cluster-analytical method. The relationships between characteristic, regimes of oligotrophic mires and activity of the biochemical processes are revealed.

**Key words:** *peat mire, peat formation, biochemical processes, microflora, cluster analysis.*

Inisheva L. I.  
**Tomsk State Pedagogical University.**  
Ul. Kievskaya, 60, Tomsk, Tomsk oblast, Russia, 634061.  
E-mail: inisheva@mail.ru

Kataev S. G.  
**Tomsk State Pedagogical University.**  
Ul. Kievskaya, 60, Tomsk, Tomsk oblast, Russia, 634061.  
E-mail: kataev@tomsk.ru

Ivanickiy A. E.  
**Tomsk State Pedagogical University.**  
Ul. Kievskaya, 60, Tomsk, Tomsk oblast, Russia, 634061.  
E-mail: bhf@tspu.edu.ru

Dubrovskaya L. I.  
**Tomsk State University.**  
Pr. Lenina, 36, Tomsk, Tomsk oblast, Russia, 634050.  
E-mail: dubrli@mail.ru

Fateev A. V.  
**Tomsk State Pedagogical University.**  
Ul. Kievskaya, 60, Tomsk, Tomsk oblast, Russia, 634061.  
E-mail: bhf@tspu.edu.ru