

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ КОМПЛЕКСА ФОТОСИСТЕМЫ II В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

**Т. Ю. Плюснина, Р. Н. Червицов, С. С. Хрущев, Н. С. Дегтерева,
Г. Ю. Ризниченко, А. Б. Рубин**

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия.

Фотосистема II (ФСII) является одним из ключевых пигмент-белковых комплексов, участвующих в первичных процессах фотосинтеза. ФСII обладает высокой чувствительностью к неблагоприятным факторам окружающей среды. Кривая индукции флуоресценции хлорофилла *a*, получаемая экспериментально при освещении исследуемых образцов фотосинтезирующих организмов, является чувствительным маркером, отражающим состояние ФС II и представляет собой сложную многофазную кривую. Высокое временное разрешение современных флуориметров и развитие методов анализа данных позволяет проследить динамику изменения этих фаз в процессе роста растений при действии различных факторов, в том числе и факторов стресса. Отдельные фазы нарастающего участка индукционной кривой могут соответствовать либо различным стадиям переноса электрона в электрон-транспортной цепи фотосинтеза, либо различным типам реакционных центров. Применение ингибитора электронного транспорта дихлорфенилдиметилмочевины (DCMU) и измерение кривых при разных интенсивностях света позволяет разделить фазы, относящиеся к разным типам реакционных центров, и фазы, указывающие на стадии переноса электрона.

Анализ кривых индукции флуоресценции может использоваться для оперативного выявления действия факторов стресса и загрязнения окружающей среды в экологическом мониторинге. Одним из основных методов, позволяющим получить характеристики фотосинтетического аппарата, является JIP-тест [1]. Математическое моделирование процессов переноса электронов в ФС II является одним из широко применяемых методов оценки эффективности фотосинтетического аппарата растений путем анализа кривых индукции флуоресценции. Для исследования большого массива экспериментальных кривых могут быть применены методы машинного обучения, такие как кластеризация и классификация, а также методы математической статистики.

Используя комплекс перечисленных математических методов, нами было исследовано изменение состояния фотосинтетического аппарата лабораторной культуры водорослей *Chlorella vulgaris* при действии солей тяжелых металлов, кадмия и хрома. Показано, что кластерный и статистический анализ выявляют раннее действие ионов кадмия и хрома, через четыре часа после добавления этих токсикантов. С помощью разработанной нами математической модели [2] было обнаружено, что ионы кадмия и хрома снижают активность кислород-выделяющих комплексов, причем действие ионов кадмия выражено существенно сильнее, чем действие ионов хрома, структура светособирающей антенны на начальных этапах действия ионов кадмия и хрома практически не меняется.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №22-11-00009.

Библиографические ссылки

1. Strasser R. J., Tsimilli-Michael M., Srivastava A. Analysis of the chlorophyll *a* fluorescence transient // George C. Papageorgiou and Govindjee (eds): Chlorophyll *a* Fluorescence: A Signature of Photosynthesis. Dordrecht : Springer Netherlands, 2004. P. 321–362.
2. Three-state mathematical model for the assessment of DCMU-treated photosystem II heterogeneity / T. Yu. Plyusnina [et al.] // Photosynthesis Research. 2024. Vol. 159. P. 303–320.