

# ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА ИНДУКЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *a* ИЗ СИЛЬНО ЗАШУМЛЕННЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНОЙ МУЛЬТИЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ<sup>1</sup>

Хрущев С.С., Плюснина Т.Ю., Антал Т.К.<sup>1</sup>, Ризниченко Г.Ю.

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Биологический факультет, каф. биофизики, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, styx@biophys.msu.ru

<sup>1</sup> Псковский государственный университет

Регистрация кривые индукции флуоресценции от природных объектов, находящихся в неблагоприятных условиях, зачастую происходит на нижнем пределе чувствительности флуорометрического оборудования. На основе предложенного авторами метода спектральной мультиэкспоненциальной аппроксимации (СМЭА) [1] разработан метод выделения сигнала индукции флуоресценции хлорофилла *a* из сильно зашумленных данных. В основу предложенного метода было положено представление о том, что изменения, происходящие в адаптировавшемся к темновым условиям фотосинтетическом аппарате при освещении, могут быть с большой точностью описаны в терминах переходов между состояниями марковской цепи. При этом идентификация конкретных состояний и графа переходов между ними для решения задачи фильтрации шумов оказывается излишней. В методе СМЭА производится разложение полученного с флуорометра сигнала по базису, составленному из функций  $e^{-t/\tau_i}$  с характерными временами  $\tau_i$ , выбранными на фиксированной логарифмической сетке с шагом  $k_{\text{step}}$ :  $\tau_{i+1} = k_{\text{step}} \tau_i$ . При использовании этого метода для шумоподавления для нахождения предэкспоненциальных множителей  $a_i$  используется  $L_1$ -регуляризация (LASSO) по методу наименьших углов (LARS) [2]. В качестве параметра фильтра задается коэффициент регуляризации  $\alpha$ . Проведен анализ полученных с помощью флуорометра AquaPen (Photon Systems Instruments, Чешская Республика) результатов измерения индукционных кривых для проб природного фитопланктона из водоемов Псковской области при значении  $k_{\text{step}} = 1.1$  и разных величинах коэффициента регуляризации  $\alpha$ . Показано, что при значении коэффициента регуляризации  $\alpha = 10^{-5}$  и меньше фильтрация шумов является неполной, а при значении коэффициента регуляризации  $\alpha = 10^{-3}$  и больше – происходит потеря существенной информации о форме сигнала. Выбор коэффициента регуляризации  $\alpha = 10^{-4}$  позволил восстановить форму кривых индукции флуоресценции для исследованных образцов и оценить значения параметров JIP-теста [3].

## Литература

1. *Antal T.* et al. Chlorophyll fluorescence induction and relaxation system for the continuous monitoring of photosynthetic capacity in photobioreactors // *Physiol. Plant.* 2019. Vol. 165, № 3, pp. 476–486. DOI: 10.1111/ppl.12693
2. *Efron B.* et al. Least Angle Regression // *Ann. Stat.* 2004. Vol. 32, № 2, pp. 407–499. DOI: 10.1214/009053604000000067
3. *Strasser R.J., Tsimilli-Michael M., Srivastava A.* Analysis of the chlorophyll *a* fluorescence transient / In: *Advances in Photosynthesis and Respiration. Chlorophyll a Fluorescence: a Signature of Photosynthesis.* Eds.: G. Papageorgiou, Govindjee. – The Netherlands: Springer, 2004. – P.321–362.

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках научного проекта государственного задания МГУ №121032500060-0 при частичной поддержке гранта РФФИ № 20-64-46018 (Псковский государственный университет).