

## Дистанционное зондирование полей температуры акваторий по деформации ОН-полосы воды в спектре комбинационного рассеяния

*М.Я. Гришин<sup>1,2</sup>, В.Н. Леднёв<sup>2,3</sup>, С.М. Першин<sup>2</sup>, А.Ф. Бункин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Измерение температуры поверхности океана в Арктике представляет интерес для климатологических исследований в связи с тем, что данный регион является чувствительным индикатором глобальных изменений климата. Информация о труднодоступных арктических территориях может быть получена только с помощью методов дистанционного зондирования. В настоящее время для измерения температуры поверхностного слоя воды в океане традиционно применяют спутниковые радиометры и скаттерометры, однако, для однозначной интерпретации результатов необходима калибровка с помощью контактных измерений.

Альтернативным методом для бесконтактных измерений температуры воды является спектроскопия комбинационного рассеяния света. Этот подход основывается на температурной зависимости профиля полосы валентных колебаний ОН в спектре комбинационного рассеяния (КР) света воды. В литературе описано несколько методов измерения температуры по деформации профиля ОН-полосы: метод «двух плеч», аппроксимация ОН-полосы суммой нескольких компонент, метод разностного сигнала и метод «взвешивания» профиля ОН-полосы. Метод «двух плеч», впервые предложенный в 1970-х гг. [1,2], заключается в сравнении интегралов интенсивности двух полос в спектре КР. Во втором методе ОН-полосу аппроксимируют суммой нескольких (как правило, от 2 до 5) гауссовых контуров и вычисляют специальную метрику, по которой судят о температуре [2,3]. Точность двух первых методов составляет порядка  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Метод разностного сигнала был предложен в 2005 г. [4] и заключается в построении разностного спектра относительно опорного спектра для выбранной температуры. Количественной метрикой является амплитуда получаемого разностного спектра. Простота реализации и чувствительность к малым изменениям профиля ОН-полосы позволяет определять температуру с точностью  $\pm 0,4^\circ\text{C}$ . Метод «взвешивания», ранее предложенный нами [5], состоит в нахождении центра масс спектральной ОН-полосы по аналогии со способом «иглы» для кривой, вычерченной самописцем и вырезанной из бумаги. Цифровая реализация заключается в аппроксимации спектральной кривой симметричным контуром и построении температурной зависимости центра контура. Точность, даваемая методом «взвешивания», в работе [5] оценена как менее  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . В данной работе представлены результаты сравнения вышеуказанных способов измерения температуры воды при разработке компактного лидара комбинационного рассеяния света для установки на борт беспилотного авиа- или подводного носителя.

Для сравнения методов обработки температурной деформации ОН-полосы при дистанционном зондировании образца дистиллированной воды был использован компактный лидар комбинационного рассеяния. Основными компонентами лидарной системы (масса 20 кг, размеры 60x40x20 см, потребление 300 Вт), разработанной в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН [6], являются импульсный твердотельный лазер ( $\text{Nd:YLiF}_4$ ) с диодной накачкой и компактный спектрометр, оборудованный стробируемой ПЗС-камерой с усилителем яркости (ICCD). Кювета с дистиллированной водой была установлена внутри термостата на расстоянии 1 м от лидара. Регистрировали спектры КР для воды при различной температуре, которую контролировали по прецизионному ртутному термометру. Полученный набор спектров был использован для сравнения различных процедур расчета температуры воды по форме ОН-полосы.

Количественное сравнение вышеописанных методов показало, что наилучшую точность определения температуры обеспечивает метод «взвешивания» ( $\pm 0,15^\circ\text{C}$ ), в то время как погрешность других методов превышала  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  [7]. Дополнительными преимуществами метода «взвешивания» являются его низкие требования к вычислительным ресурсам и устойчивость к начальным параметрам. Оба эти требования являются важными при разработке компактных полностью автоматических системы для установки на борт беспилотных авиа- или подводных платформ. Оценка влияния сглаживания спектров (скользящее среднее, алгоритм Савицкого-Голея и фильтр Фурье) на точность измерения температуры воды показала, что сглаживание спектров не даёт заметного увеличения точности измерения температуры, а для ряда подходов значительно снижает точность измерений. В то же время метод «взвешивания» является устойчивым к соотношению сигнал-шум, что позволяет повысить скорость измерений температуры или увеличить дальность зондирования.

В заключении представлены результаты лазерного дистанционного зондирования пресноводной акватории, проведённого летом 2015 г. на Горьковском водохранилище (Нижегородская область). Проведено лазерное зондирование пресноводного водохранилища в условиях высокой концентрации водорослей («цветение воды»), которое существенно влияет на точность измерения температуры воды [8].

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №15-35-50449 мол\_нр, №16-35-50142 мол\_нр).

#### Литература

1. *Chang C.H., Young L.A., Leonard D.A.* Remote measurement of fluid temperature by Raman scattered radiation // U.S. patent 3,986,775. 1976.
2. *Leonard D.A., Caputo B., Hoge F.E.* Remote sensing of subsurface water temperature by Raman scattering // Applied Optics. 1979. V. 18, N. 11. P. 1732-1745.
3. *Sun Q.* The Raman OH stretching bands of liquid water // Vibrational Spectroscopy. 2009. V. 51, N. 2. P. 213-217.
4. *Risović D., Furić K.* Comparison of Raman spectroscopic methods for the determination of supercooled and liquid water temperature // Journal of Raman Spectroscopy. 2005. V. 36, N. 8. P. 771-776.
5. *Першин С.М., Бункин А.Ф.* «Скачок» центра и ширины огибающей спектральной полосы КР валентных колебаний О-Н при фазовых переходах первого и второго рода в воде // Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 85. С. 209-212.
6. *Bunkin A.F., Klinkov V.K., Lednev V.N., Lushnikov D.L., Marchenko A.V., Morozov E.G., Pershin S.M. and Yulmetov R.N.* Remote sensing of seawater and drifting ice in Svalbard fjords by compact Raman lidar // Applied Optics. 2012. V. 51, N. 22. P. 5477-5485.
7. *Lednev V.N., Grishin M.Ya., Pershin S.M., Bunkin A.F.* Quantifying Raman OH-band spectra for remote water temperature measurements // Optics Letters. 2016. V. 41, N. 20. P. 4625-4628.
8. *Леднёв В.Н., Гришин М.Я., Першин С.М., Бункин А.Ф., Капустин И.А., Мольков А.А., Ермаков С.А.* Лидарное зондирование пресноводной акватории с высокой концентрацией фитопланктона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 1. С. 119-134.