

УДК 535.337

**ОБЗОР МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
ВОДЫ ПО ФОРМЕ ОН-ПОЛОСЫ В СПЕКТРЕ КОМБИНАЦИОННОГО
РАССЕЯНИЯ СВЕТА****Гришин Михаил Ярославович,**

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник

Центр биофотоники, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва

e-mail: mikhail.grishin@kapella.gpi.ru**Аннотация**

В статье рассмотрены наиболее распространённые в литературе методы обработки спектров спонтанного комбинационного рассеяния воды, используемые для определения температуры воды с помощью лазерного дистанционного зондирования. Приведены описания методов, сравнена точность дистанционного определения температуры воды с помощью указанных методов.

Ключевые слова: дистанционное измерение температуры воды, спектроскопия комбинационного рассеяния, лазерное дистанционное зондирование, методы обработки спектров

**REVIEW ON REMOTE WATER TEMPERATURE MEASUREMENT
TECHNIQUES BASED ON THE WATER RAMAN OH BAND
QUANTIFICATION****Grishin Mikhail Yaroslavovich,**

PhD, Researcher

Biophotonics Center, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscowe-mail: mikhail.grishin@kapella.gpi.ru**ABSTRACT**

The manuscript presents a review on the most widely known spectra processing techniques used for remote water temperature measurements. The described techniques are based on the Raman spectroscopy and are applied in the scope of laser remote sensing. Descriptions of the techniques are given, and water temperature measurement precision is compared for the different techniques.

Keywords: remote water temperature measurements, Raman spectroscopy, laser remote sensing, spectral data processing techniques

Введение

В последние десятилетия существенно возрос интерес к мониторингу параметров мирового океана, в частности, в арктическом регионе. Это связано с активизацией хозяйственной деятельности человека в данных областях, так как арктический регион является чувствительным индикатором глобальных изменений климата.

Для построения моделей климата и получения на их основе реалистичных оценок необходимы массивы достоверных экспериментальных данных о параметрах воды и льда в разных точках мирового океана. Мониторинг обширных пространств арктического региона возможен только с помощью дистанционного зондирования [1–3]. Традиционные методы дистанционного измерения одного из важнейших параметров – температуры поверхности воды и льда, – включают в себя применение спутниковых радаров [1,4,5] и микроволновых и лазерных скаттерометров [2,6–9] спутникового или авиационного базирования.

Вместе с тем следует отметить, что вышеуказанные методы имеют ряд фундаментальных недостатков. При использовании микроволновых и лазерных скаттерометров измерение температуры выполняют по спектру инфракрасного излучения тонкого слоя воды толщиной 10–30 мкм у поверхности. Однако, проведенные ранее прецизионные измерения температурного профиля верхнего слоя океана [10] выявили, что температура поверхностных слоев воды толщиной до 50 мкм снижается на величину до 1 °С по сравнению с температурой на глубине более 1-10 см при наличии ветра над поверхностью воды. Также, данные радарных измерений могут быть искажены поверхностными капиллярными волнами. Указанные факторы приводят к недостоверным результатам дистанционного измерения температуры стандартными методами. Очевидной становится необходимость калибровки спутниковых измерений с помощью контактных измерений.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света является одним из альтернативных методов дистанционного измерения температуры поверхности океана. В данном методе используют импульсный лазер с длиной волны излучения, попадающей в спектральное окно прозрачности воды, как правило, используют излучение второй гармоники твердотельных лазеров с активными элементами на основе кристалла алюмоиттриевого граната, легированного ионами неодима (Nd:АИГ, длина волны второй гармоники 532 нм). Лазерный импульс направляют на исследуемый объект (поверхность акватории), при распространении внутри воды лазерное излучение рассеивается в том числе в сторону излучателя. Рассеянное излучение собирают с помощью оптической системы, раскладывают в спектр в спектрометре и с помощью стробируемого приёмника (например, линейный или матричный ПЗС-детектор с усилителем яркости) регистрируют спектр из столба воды 0,5–5 м при интегрировании по глубине, и по форме ОН-полосы спектра комбинационного рассеяния определяют температуру воды. Стробируемым называют детектор, который можно считывать с точно управляемой задержкой по времени относительно импульса синхронизации (например, относительно момента генерации зондирующего лазерного импульса), что позволяет управлять расстоянием, с которого будут зарегистрированы рассеянные фотоны, то есть, управлять пространственным положением области, о которой будет получена информация в процессе лазерного дистанционного зондирования.

Первые сообщения о влиянии температуры на спектр спонтанного комбинационного рассеяния (КР) в воде начали появляться в середине 1960-х гг. [11–13] и

повлекли за собой многочисленные работы, в которых были предприняты попытки объяснить большую спектральную ширину полосы валентных колебаний О-Н в спектре КР воды, а также объяснить деформацию огибающей при изменении температуры воды.

Во многих работах было отмечено, что при увеличении температуры воды амплитуда низкочастотного крыла ОН-полосы ($\sim 3000\text{--}3300\text{ см}^{-1}$) снижается, а амплитуда высокочастотного крыла ($\sim 3300\text{--}3800\text{ см}^{-1}$) растёт, и происходит смещение центра полосы в высокочастотную область (см. пример ОН-полосы в спектре КР воды при разных температурах на рисунке 1).

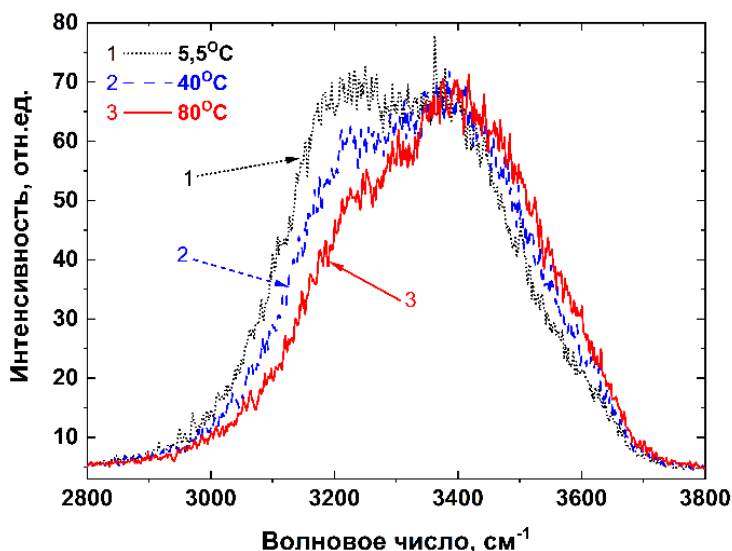


Рисунок 1. Профиль полосы валентных колебаний ОН в спектре спонтанного КР воды при разных температурах образца: линия 1 (точечная) – 5,5°C, линия 2 (пунктирная) – 40°C, линия 3 (сплошная) – 80°C.

Известно, что молекулы воды помимо сил Ван-дер-Ваальса также взаимодействуют посредством водородных связей [14], формируя кластеры разных размеров [15]. Измерения, проведённые с помощью инфракрасной спектроскопии [16–20], показали, что симметричные и антисимметричные валентные колебания О-Н-групп молекул воды, находящихся в составе разноразмерных кластеров, проявляются в спектре спонтанного КР в диапазоне частотных сдвигов 3100–3600 см⁻¹. На основании этих данных принято считать, что широкая полоса в спектрах спонтанного КР объёмных образцов воды является спектральным откликом симметричных и антисимметричных валентных колебаний О-Н-групп молекул воды и состоит из нескольких компонент, испытывающих влияние внутримолекулярных и межмолекулярных взаимодействий. Общая теория, объясняющая формирование и свойства ОН-полосы в спектре спонтанного КР воды, до сих пор находится в стадии интенсивного развития.

Несмотря на то, что на сегодняшний день не существует единой общепринятой интерпретации формы ОН-полосы и объяснения её аномально большой ширины, описанная в предыдущем разделе особенность ОН-полосы – зависимость формы огибающей от температуры воды – нашла широкое практическое применение для лазерного дистанционного измерения температуры водных образцов.

Леонард (D.A. Leonard) и др. [21, 22] впервые продемонстрировали возможность дистанционного измерения температуры поверхностного слоя морской воды в натуральных условиях в режиме реального времени с помощью лидара (LIDAR, Light Detection and

Ranging) комбинационного рассеяния. В настоящее время известно несколько методик для дистанционного измерения температуры воды по спектрам спонтанного КР, например, метод «двух плеч» [21–23], метод аппроксимации ОН-полосы составляющими компонентами [24, 25], метод разностного спектра [26], метод «взвешивания» [27]. Каждый из методов вводит некую количественную характеристику спектра, т.н. метрику, температурная зависимость которой и определяет точность, обеспечиваемую тем или иным методом. Далее перечисленные методы будут рассмотрены подробнее.

Метод «двух плеч»

Леонард (D.A. Leonard) и др. [21, 22] предложили метод «двух плеч» как простой и эффективный способ количественного описания деформаций профиля ОН-полосы. Эта методика основана на сравнении интенсивностей (интегралов спектральной кривой в полосах равной ширины) низкочастотного и высокочастотного крыла ОН-полосы при разных температурах. Для этого на первом шаге определяют границу между двумя плечами, её выбирают в изобестической точке (точке постоянной амплитуды спектра при разных значениях температуры). Затем вычисляют интегралы интенсивности двух полос («двух плеч») по обе стороны от изобестической точки (в высокочастотной и низкочастотной области). Метрикой является отношение полученных интегралов (см. рисунок 2а). Для разных значений температуры рассчитывают значение данной метрики (отношение интегралов плеч), получают её температурную зависимость и аппроксимируют линейной функцией. Здесь и далее максимальная точность измерения температуры, обеспечиваемая тем или иным методом, определяется как ширина доверительного интервала аппроксимации температурной зависимости метрики метода (см. пример на рисунке 2б).

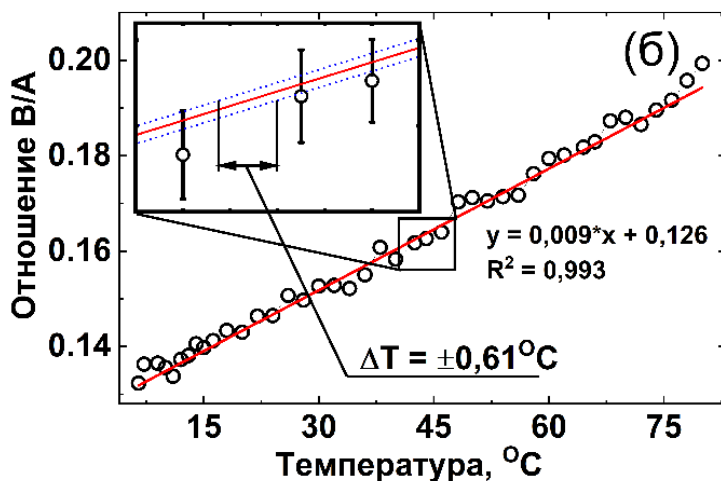
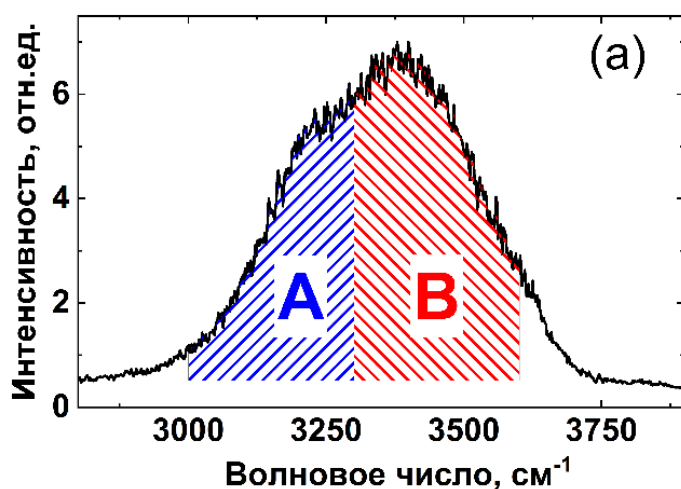


Рисунок 2. Иллюстрация метода «двух плеч»: (а) графическое представление метрики метода, (б) температурная зависимость метрики и пример определения точности метода по ширине доверительного интервала аппроксимации: на вставке сплошная линия – линейная аппроксимация экспериментальных данных, точечные линии – границы доверительного интервала.

Типичная точность измерения температуры воды этим методом оценивается как $\pm 1,2$ °С. В недавней работе О (М.-К. Oh) и др. [24] сообщили о достижении более высокой точности $\pm 0,2$ °С для высококачественных спектров КР воды. Однако, в своём эксперименте они использовали импульсный лазер и нестробируемый детектор (ПЗС-камеру), что неприменимо для дистанционного зондирования в природных условиях, особенно в дневное время при наличии солнечной засветки. Систематическое исследование метода «двух плеч» выполнили Артлетт и Паск (С.Р. Artlett, Н.М. Pask) [23]. Они продемонстрировали, что для спектров КР с высоким отношением сигнал-шум, полученных с помощью нестробируемого детектора, возможно получить предельную точность $\pm 0,1$ °С.

Метод аппроксимации

Метод аппроксимации количественно описывает температурную зависимость ОН-полосы с помощью её приближенного представления суммой двух или более гауссовых компонент [21, 15, 28, 29]. Недавно О (М.-К. Oh) и др. [24] показали, что аппроксимация двумя гауссовыми компонентами является наилучшим выбором для измерения температуры этим методом. Брески (В. Breschi) и др. [25] аппроксимировали ОН-полосу суммой двух гауссовых контуров (высокой и низкой частоты) и затем использовали отношение площадей этих контуров как метрику, зависящую от температуры. В таком подходе среднеквадратичное отклонение вычисленной температуры от измеренной контактным термометром не превышало 0,8 °С. Те же авторы позднее улучшили этот подход [30], введя особую метрику для двух гауссовых контуров (т.н. спектральный маркер): $R = (H_A/W_A)/(H_B/W_B)$, где W – полная ширина соответствующего гауссова контура на полувысоте, и H – его амплитуда (см. иллюстрацию на рисунке 3). Однако, О (М.-К. Oh) и др. [24] показали, что метод аппроксимации составляющими компонентами менее точен ($\pm 0,4$ °С), чем метод «двух плеч» ($\pm 0,2$ °С). Авторы объяснили двукратное снижение точности тем, что при аппроксимации только двумя компонентами результирующий контур недостаточно хорошо повторяет форму экспериментальной кривой, что приводит к погрешностям в определении параметров W и H и ухудшает точность определения температуры.

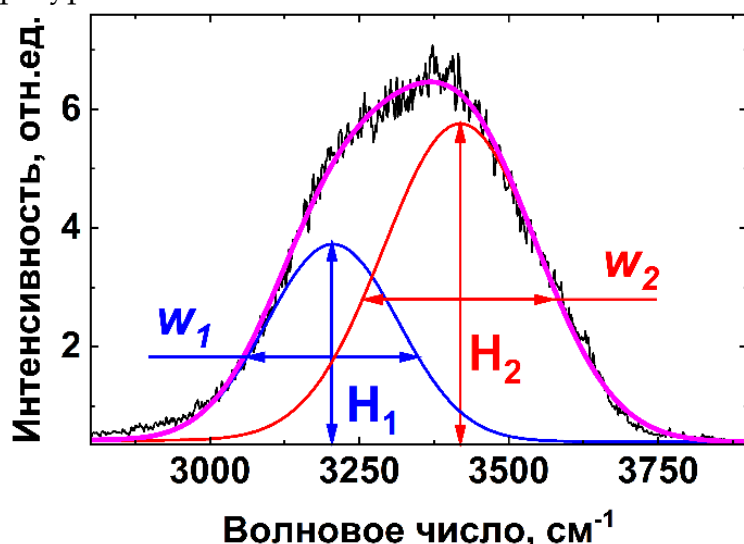


Рисунок 3. Иллюстрация метода аппроксимации. Тонкими линиями показаны гауссовы компоненты суммарной аппроксимирующей кривой.

Метод разностного спектра

Метод разностного спектра (Raman Difference Spectroscopy, RDS) для количественного описания температурных деформаций профиля ОН-полосы предложили Рисович и Фурич (D. Risović, K. Furić) [26]. В этом методе регистрируют опорный спектр при известной температуре, амплитуду полосы валентных колебаний ОН в опорном спектре принимают равной I_0 , далее регистрируют спектры при изменении температуры и вычитают из них опорный спектр, получая разностный сигнал с размахом амплитуды I_d (см. рисунок 4). В этой работе было показано, что отношение $\frac{I_d}{I_0}$ пропорционально разности температур образцов, для которых были зарегистрированы опорный и текущий спектры. Далее строят температурную зависимость полученного отношения и аппроксимируют её линейной функцией. Авторы [26] получили для метода RDS более высокую точность измерения температуры ($\pm 0,4$ °C) в сравнении с методом аппроксимации составляющими компонентами ($\pm 0,7$ °C).

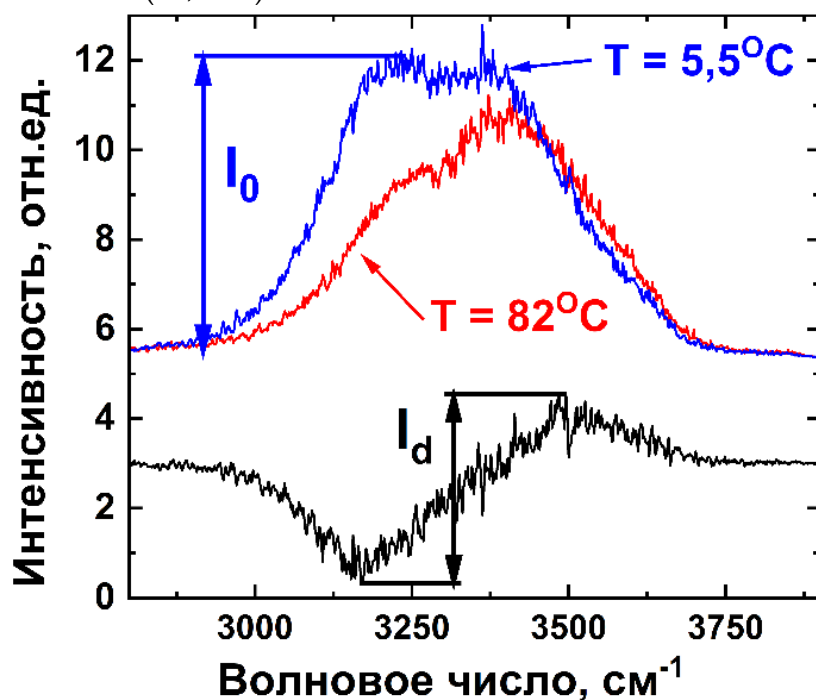


Рисунок 4. Иллюстрация метода разностного спектра.

Метод «взвешивания»

Метод «взвешивания» был предложен в ИОФ РАН в конце 1990-х гг. С.М. Першиным и А.Ф. Бункиным [31] для количественного описания деформаций профиля ОН-полосы спонтанного КР воды, вызванных вариацией температуры образца. Основная идея метода – определение гравитационного центра ОН-полосы с помощью аппроксимации спектральной кривой симметричным контуром (обычно гауссовым, см. рисунок 5). Этот метод является цифровым аналогом подхода, применявшегося для поиска центра масс кривой, полученной на самописце. Для этого данную кривую вырезали по контуру из бумажной ленты и с помощью иглы находили её центр масс, т.е. точку, при вращении вокруг которой фигура находится в положении безразличного равновесия. Абсцисса гравитационного центра ОН-полосы, выраженная в волновых числах, линейно увеличивается с повышением температуры воды, и точность измерения температуры воды методом «взвешивания» была оценена как $\leq \pm 0,5$ °C [31]. Метод «взвешивания» сочетает в себе простоту обработки данных и высокую чувствительность к малейшим деформациям

профиля ОН-полосы и был успешно применён в разных приложениях, таких как измерение толщины льда и исследование особых точек воды [32, 33].

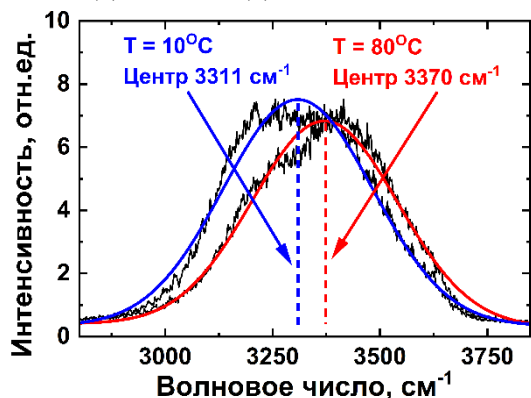


Рисунок 5. Иллюстрация метода «взвешивания». Сплошными линиями показаны аппроксимирующие гауссовы контуры для двух спектров, пунктирными линиями указаны положения центров аппроксимирующих контуров.

Недавно были проведены систематические эксперименты по измерению температуры воды по спектрам спонтанного КР с помощью метода «взвешивания», и была достигнута точность $\pm 0,15$ °C [27].

Выводы

В статье рассмотрены наиболее распространённые методы обработки спектров спонтанного комбинационного рассеяния воды для дистанционного определения температуры образца: метод «двух плеч», метод аппроксимации, метод разностного сигнала и метод «взвешивания». Приведены описания методов, даны ссылки на работы, в которых данные методы были впервые описаны, сравнена точность дистанционного определения температуры воды с помощью указанных методов. Показано, что наибольшую точность измерения температуры обеспечивает метод «взвешивания».

Список литературы:

1. Measures R.M. Laser remote sensing: fundamentals and applications. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 1984. 500 p.
2. Bunkin F.A., Voliak K. Laser remote sensing of the ocean: methods and applications. Wiley NY, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2001. 244 p.
3. Haykin S. Remote sensing of sea ice and icebergs. John Wiley & Sons, 1994. Vol. 13.
4. Johannessen O.M., Miles M., Bjørge E. The Arctic's shrinking sea ice. Nature Publishing Group, 1995.
5. Johannessen O.M., Shalina E. V, Miles M.W. Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation // Science. American Association for the Advancement of Science, 1999. Vol. 286, № 5446. P. 1937–1939.
6. Креков Г.М., Матвиенко Г.Г. Развитие лазерных технологий в проблеме дистанционного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 835–844.
7. Remund Q.P., Long D.G. Sea ice extent mapping using Ku band scatterometer data // J. Geophys. Res. Ocean. Wiley Online Library, 1999. Vol. 104, № C5. P. 11515–11527.
8. Бункин А.Ф., Власов Д.В., Миркамилов Д.М. Физические основы лазерного аэрозондирования поверхности Земли. ФАН Ташкент, 1987.

9. Pershin S., Lyash A., Makarov V. Atmosphere remote sensing by microjoule pulses of diode-laser // *Phys. Vib.* 2001. Vol. 9. P. 256–260.
10. Soloviev A., Lukas R. Observation of large diurnal warming events in the near-surface layer of the western equatorial Pacific warm pool // *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* Elsevier, 1997. Vol. 44, № 6. P. 1055–1076.
11. Wall T.T., Hornig D.F. Raman intensities of HDO and structure in liquid water // *J. Chem. Phys.* 1965. Vol. 43, № 6. P. 2079–2087.
12. Walrafen G.E. et al. Temperature dependence of the low- and high-frequency Raman scattering from liquid water // *J. Chem. Phys.* 1986. Vol. 85, № 12. P. 6970–6982.
13. Walrafen G.E. Raman spectral studies of the effects of electrolytes on water // *J. Chem. Phys.* 1962. Vol. 36. P. 1035–1042.
14. Stillinger F.H. Water revisited // *Science*. 1980. Vol. 209, № 4455. P. 451–457.
15. Sun Q. The Raman OH stretching bands of liquid water // *Vib. Spectrosc.* 2009. Vol. 51, № 2. P. 213–217.
16. Buck U., Huisken F. Infrared spectroscopy of size-selected water and methanol clusters // *Chem. Rev.* 2000. Vol. 100, № 11. P. 3863–3890.
17. Huang Z.S., Miller R.E. High-resolution near-infrared spectroscopy of water dimer // *J. Chem. Phys.* 1989. Vol. 91, № 11. P. 6613–6631.
18. Bouteiller Y., Perchard J.P. The vibrational spectrum of (H₂O)₂: comparison between anharmonic ab initio calculations and neon matrix infrared data between 9000 and 90 cm⁻¹ // *Chem. Phys.* 2004. Vol. 305, № 1–3. P. 1–12.
19. Fröchtenicht R. et al. Vibrational spectroscopy of small water complexes embedded in large liquid helium clusters // *J. Chem. Phys.* 1996. Vol. 105, № 15. P. 6128–6140.
20. Diken E.G., Robertson W.H., Johnson M.A. The vibrational spectrum of the neutral (H₂O)₆ precursor to the “magic” (H₂O)₆-cluster anion by argon-mediated, population-modulated electron attachment spectroscopy // *J. Phys. Chem. A*. 2004. Vol. 108, № 1. P. 64–68.
21. Leonard D.A., Caputo B., Hoge F.E. Remote sensing of subsurface water temperature by Raman scattering // *Appl. Opt.* 1979. Vol. 18, № 11. P. 1732–1745.
22. Chang C.H., Young L.A., Leonard D.A. Remote measurement of fluid temperature by Raman scattered radiation: pat. US3986775A USA. USA, 1976. P. 8.
23. Artlett C.P., Pask H.M. Optical remote sensing of water temperature using Raman spectroscopy // *Opt. Express*. 2015. Vol. 23, № 25. P. 31844–31856.
24. Oh M.-K. et al. Ultimate sensing resolution of water temperature by remote Raman spectroscopy // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, № 10. P. 2639–2646.
25. Breschi B. et al. Measurement of water column temperature by Raman scattering // *EARSel Adv. Remote Sens.* 1992. Vol. 1. P. 131.
26. Risović D., Furić K. Comparison of Raman spectroscopic methods for the determination of supercooled and liquid water temperature // *J. Raman Spectrosc.* 2005. Vol. 36, № 8. P. 771–776.
27. Lednev V.N. et al. Quantifying Raman OH-band spectra for remote water temperature measurements // *Opt. Lett.* 2016. Vol. 41, № 20. P. 4625–4628.

28. Hu Q. et al. An extensive study on Raman spectra of water from 253 to 753K at 30MPa: A new insight into structure of water // J. Mol. Spectrosc. 2013. Vol. 292. P. 23–27.
29. Murphy F.W., Bernstein J.H. Raman spectra and an assignment of the vibrational stretching region of water // J. Phys. Chem. 1972. Vol. 76. P. 1147–1152.
30. Raimondi V., Cecchi G. Lidar Field Experiment for Monitoring Sea Water Column Temperature // EARSEL Adv. Remote Sens. 1995. Vol. 3. P. 84–89.
31. 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. №. 2. С. 209-212.
32. Bunkin A.F. et al. Sequence of water thermodynamic singularities in Raman spectra // J. Raman Spectrosc. 2000. Vol. 31, № 8-9. P. 857–861.
33. Pershin S.M. et al. Ice thickness measurements by Raman scattering // Opt. Lett. 2014. Vol. 39, № 9. P. 2573–2575.

References:

1. Measures R.M. Laser remote sensing: fundamentals and applications. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 1984. 500 p.
2. Bunkin F.A., Voliak K. Laser remote sensing of the ocean: methods and applications. Wiley NY, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2001. 244 p.
3. Haykin S. Remote sensing of sea ice and icebergs. John Wiley & Sons, 1994. Vol. 13.
4. Johannessen O.M., Miles M., Bjørge E. The Arctic's shrinking sea ice. Nature Publishing Group, 1995.
5. Johannessen O.M., Shalina E. V, Miles M.W. Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation // Science. American Association for the Advancement of Science, 1999. Vol. 286, № 5446. P. 1937–1939.
6. Krekov G. M., Matvienko G. G. Development of laser technology in the problem of remote sensing of the atmosphere // Optics of the Atmosphere and the Ocean. 2010. Vol. 23. №. 10. P. 835-844.
7. Remund Q.P., Long D.G. Sea ice extent mapping using Ku band scatterometer data // J. Geophys. Res. Ocean. Wiley Online Library, 1999. Vol. 104, № C5. P. 11515–11527.
8. Bunkin A.F., Vlasov D.V., Mirkamilov D.M. Physical Foundations of the Laser Aerosounding of the Earth's Surface // Tashkent: FAN. 1987.
9. Pershin S., Lyash A., Makarov V. Atmosphere remote sensing by microjoule pulses of diode-laser // Phys. Vib. 2001. Vol. 9. P. 256–260.
10. Soloviev A., Lukas R. Observation of large diurnal warming events in the near-surface layer of the western equatorial Pacific warm pool // Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap. Elsevier, 1997. Vol. 44, № 6. P. 1055–1076.
11. Wall T.T., Hornig D.F. Raman intensities of HDO and structure in liquid water // J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43, № 6. P. 2079–2087.
12. Walrafen G.E. et al. Temperature dependence of the low- and high-frequency Raman scattering from liquid water // J. Chem. Phys. 1986. Vol. 85, № 12. P. 6970–6982.
13. Walrafen G.E. Raman spectral studies of the effects of electrolytes on water // J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36. P. 1035–1042.

14. Stillinger F.H. Water revisited // *Science*. 1980. Vol. 209, № 4455. P. 451–457.
15. Sun Q. The Raman OH stretching bands of liquid water // *Vib. Spectrosc.* 2009. Vol. 51, № 2. P. 213–217.
16. Buck U., Huisken F. Infrared spectroscopy of size-selected water and methanol clusters // *Chem. Rev.* 2000. Vol. 100, № 11. P. 3863–3890.
17. Huang Z.S., Miller R.E. High-resolution near-infrared spectroscopy of water dimer // *J. Chem. Phys.* 1989. Vol. 91, № 11. P. 6613–6631.
18. Bouteiller Y., Perchard J.P. The vibrational spectrum of (H₂O)₂: comparison between anharmonic ab initio calculations and neon matrix infrared data between 9000 and 90 cm⁻¹ // *Chem. Phys.* 2004. Vol. 305, № 1–3. P. 1–12.
19. Fröchtenicht R. et al. Vibrational spectroscopy of small water complexes embedded in large liquid helium clusters // *J. Chem. Phys.* 1996. Vol. 105, № 15. P. 6128–6140.
20. Diken E.G., Robertson W.H., Johnson M.A. The vibrational spectrum of the neutral (H₂O)₆ precursor to the “magic” (H₂O)₆-cluster anion by argon-mediated, population-modulated electron attachment spectroscopy // *J. Phys. Chem. A*. 2004. Vol. 108, № 1. P. 64–68.
21. Leonard D.A., Caputo B., Hoge F.E. Remote sensing of subsurface water temperature by Raman scattering // *Appl. Opt.* 1979. Vol. 18, № 11. P. 1732–1745.
22. Chang C.H., Young L.A., Leonard D.A. Remote measurement of fluid temperature by Raman scattered radiation: pat. US3986775A USA. USA, 1976. P. 8.
23. Artlett C.P., Pask H.M. Optical remote sensing of water temperature using Raman spectroscopy // *Opt. Express*. 2015. Vol. 23, № 25. P. 31844–31856.
24. Oh M.-K. et al. Ultimate sensing resolution of water temperature by remote Raman spectroscopy // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, № 10. P. 2639–2646.
25. Breschi B. et al. Measurement of water column temperature by Raman scattering // *EARSel Adv. Remote Sens.* 1992. Vol. 1. P. 131.
26. Risović D., Furić K. Comparison of Raman spectroscopic methods for the determination of supercooled and liquid water temperature // *J. Raman Spectrosc.* 2005. Vol. 36, № 8. P. 771–776.
27. Lednev V.N. et al. Quantifying Raman OH-band spectra for remote water temperature measurements // *Opt. Lett.* 2016. Vol. 41, № 20. P. 4625–4628.
28. Hu Q. et al. An extensive study on Raman spectra of water from 253 to 753K at 30MPa: A new insight into structure of water // *J. Mol. Spectrosc.* 2013. Vol. 292. P. 23–27.
29. Murphy F.W., Bernstein J.H. Raman spectra and an assignment of the vibrational stretching region of water // *J. Phys. Chem.* 1972. Vol. 76. P. 1147–1152.
30. Raimondi V., Cecchi G. Lidar Field Experiment for Monitoring Sea Water Column Temperature // *EARSel Adv. Remote Sens.* 1995. Vol. 3. P. 84–89.
31. Pershin S.M., Bunkin A.F. "A jump" in the position and width of the Raman band envelope of OH valence vibrations upon phase transitions of the first and second kinds in water // *Optics and Spectroscopy*. 1998. Vol. 85. № 2. P. 190–193.
32. Bunkin A.F. et al. Sequence of water thermodynamic singularities in Raman spectra // *J. Raman Spectrosc.* 2000. Vol. 31, № 8–9. P. 857–861.

33. Pershin S.M. et al. Ice thickness measurements by Raman scattering // Opt. Lett. 2014. Vol. 39, № 9. P. 2573–2575.