

Hyperspectral imaging of sediment cores - a case study of Lake Khorlaket (Western Caucasus)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Alexandrin M.Y.*, Molenkamp N.B.

Institute of Geography RAS, 29 building 4 Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. The study focuses on the hyperspectral imaging of sediment cores – a novel analytical method providing high-resolution biogenic markers – with sediment core of Lake Khorlaket (Western Caucasus) as a case study.

Keywords: hyperspectral imaging, lake sediments, high-resolution analyses, biogenic markers, Caucasus

For citation: Alexandrin M.Y., Molenkamp N.B. Hyperspectral imaging of sediment cores - a case study of Lake Khorlaket (Western Caucasus) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 229-233. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-229

1. Introduction

During the last decades high-resolution methods of sedimentary analyses have provided a huge leap in understanding natural processes and allowed state-of-the-art paleoclimatic reconstructions. Hyperspectral imaging is a novel method for the analysis of sediment cores with a number of crucial advantages – it offers high-resolution data; it is non-destructive while being time and cost-efficient. Here we present our first experience of hyperspectral imaging of a sediment core of Lake Khorlaket located in the Western Caucasus and uncover the method's potential for paleoreconstructions.

2. Materials and methods

Within the facilities of the Laboratory of environmental paleoarchives of the Institute of Geography RAS a dedicated setup for hyperspectral imaging of sediment cores was recently built. It is comprised of a hyperspectral camera, a compatible Specim LabScanner with halogen lamp lighting and custom-made dollies for scanning long sediment cores. The camera Specim FX10 works in a line-scan mode in the visible and near-infrared (VNIR) area (400-1000 nm region) with 448 spectral bands. The spatial resolution of the acquired images is 229 µm with a mean spectral resolution of 5.5 nm. The core was scanned in 8 sections of approximately 40cm, resulting in an overlap of approximately 10cm per section.

A specialized software package was developed for processing, calibration, stitching and analysis of the

hyperspectral data. The scans were corrected for dark counts (closed shutter), white reference (Teflon calibration sample), keystone and smile effects. Regions of interest were selected from the center of each sediment section and were subsequently stitched by minimizing the SSE (sum of square error) of the overlap between sections. Cracks in the core, due to the drying process were identified in the image and subsequently ignored during calculations. The resultant preprocessed data is a hyperspectral data cube with first two dimensions corresponding to the length and width of an image in pixels and a third spectral dimension.

Lake Khorlaket (43°29'36"N; 42°13'05"E, 2063 m a.s.l.) is situated 20 km west-north-west of the Elbrus Massif and approx. 60 km north of the Main Caucasus Ridge. The mean depth is 3.8 m with a maximum depth of 8 m in the central part of the lake. The sediment core HOR1 of Lake Khorlaket (Western Caucasus) was used as a pilot object for our hyperspectral imaging project due to its contrasting sedimentary facies with alternating thin-layered clayey sections and gyttja sections.

The core has been subject to a number of sedimentary analyses including conventional laboratory analyses carried out within the facilities of the IG RAS as well as high-resolution micro-XRF analysis with the use of GEOTEK MSCL-XYZ Workstation at the Institute of Oceanology RAS. The age-depth model for the core HOR1 is robust – it is based on 11 AMS 14C dates and spans ca. 6700-1500 cal BP. The lake's catchment area and abrupt sedimentation changes have been subject to detailed geomorphic study (Shvarev et al., 2023).

*Corresponding author.

E-mail address: alexandrin@igras.ru (M.Y. Alexandrin)

Received: June 06, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



3. Results and discussion

Within the VNIR area a number of spectral indicators reflecting certain variability of sedimentary properties were reported. Here we focus on the most used and credible of them – an absorption feature around 670 nm. Chlorophyll *a* and its degradation products are known to absorb in similar regions of the electromagnetic spectrum between 650-700 nm. A spectral fingerprint of chlorophyll *a* and its derivatives can thus be estimated by means of calculating the depth of an absorption feature around 670 nm – Relative absorption band depth – RABD670 or, alternatively, as an area of an absorption feature or RABA670 (Rein and Sirocko, 2002). A number of studies report extremely high correlations between those parameters and chlorophyll *a* concentrations directly measured with high-performance liquid chromatography (HPLC) (Wolfe et al., 2006). The general approach is that organic-rich sediments will have higher values of these parameters as opposed to those primarily affected by terrigenous mineroclastics.

In this study, we investigate the potential of the chlorophyll *a* related spectral indices of the sediment core of Lake Khorlaket to reflect the downcore variations of organic content and productivity. In order to trace that, we have performed a correlation and multivariate analysis of the dataset consisting of RABD670 and RABA670 values, micro-XRF-derived elemental concentrations, results of laboratory analyses (LOI550, magnetic susceptibility, grain size).

The results indicate a consistent relation between our spectral indices and the other known biogenic proxies. Specifically, we have established that RABD670 or RABA670 are correlated with the content of bromine that we previously used a high-resolution marker for heat availability in the Caucasus (Alexandrin et al., 2023) as well as with XRF incoherent/coherent scattering ratio and loss-on-ignition (Spearman's correlation coefficients in the 0.48-0.77 range). High negative correlation coefficients (Spearman's -0.62-0.86) are registered for RABD670 or RABA670 and the concentrations of lithogenic elements and magnetic susceptibility.

4. Conclusions

We argue that RABD670 or RABA670 parameter can be used as a high-resolution proxy for autochthonous productivity. In the case of Lake Khorlaket, the

temporal resolution of our spectral chronology is less than 1 year. Such a high temporal resolution allows for detailed reconstructions of certain short-term climatic events, uncovering internal periodicity, along with general reconstructions of long-term variability.

5. Acknowledgments

The studies were supported by grant of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (agreement № 075-15-2024-554 of 24.04.2024).

We thank Dmitry Borisov (Institute of Oceanology RAS) for assistance with micro-XRF analysis

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Alexandrin M.Y., Solomina O.N., Darin A.V. 2023. Variations of heat availability in the Western Caucasus in the past 1500 years inferred from a high-resolution record of bromine in the sediment of Lake Karakel. *Quaternary International* 664: 20-32.
- Rein B., Sirocko F. 2002. In-situ reflectance spectroscopy-analysing techniques for high-resolution pigment logging in sediment cores. *International Journal of Earth Sciences* 91: 950-954.
- Shvarev S.V., Alexandrin M.Y., Ivanov M.M. et al. 2023. The Interaction of Climatic and Tectonic Factors in the Formation of Sediment Runoff in the Holocene in the Khorlaket Lake Catchment (North Caucasus). In *Doklady Earth Sciences* 513 (1): S75-S96. DOI: [10.1134/S1028334X23602390](https://doi.org/10.1134/S1028334X23602390)
- Wolfe A.P., Vinebrooke R.D., Michelutti N. et al. 2006. Experimental calibration of lake-sediment spectral reflectance to chlorophyll *a* concentrations: methodology and paleolimnological validation. *Journal of Paleolimnology* 36: 91-100. DOI: [10.1007/s10933-006-0006-6](https://doi.org/10.1007/s10933-006-0006-6)

Гиперспектральное сканирование кернов донных осадков - на примера озера Хорлакель (Западный Кавказ)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Александрин М.Ю.*, Моленкамп Н.Б.

Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4.

АННОТАЦИЯ. В работе рассматривается гиперспектральное сканирование кернов донных осадков – новый метод анализа, обеспечивающий получение биогенных маркеров с высоким разрешением. В качестве примера используется керн донных осадков озера Хорлакель (Западный Кавказ).

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, озерные осадки, анализы высокого разрешения, биогенные маркеры, Кавказ

Для цитирования: Александрин М.Ю., Моленкамп Н.Б. Гиперспектральное сканирование кернов донных осадков - на примера озера Хорлакель (Западный Кавказ) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 229-233. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-229

1. Введение

Благодаря высокоразрешающим анализам кернов донных осадков за последнее время достигнут значительный прогресс в понимании природных процессов. На их основе было создано множество детальных палеорекопструкций. Гиперспектральная съемка – метод анализа кернов донных осадков, который стал применяться относительно недавно. Метод имеет ряд принципиальных преимуществ – он обеспечивает данные высокого разрешения, является неdestructивным, не требует значительных вложений времени и средств. Настоящая работа рассматривает первый опыт гиперспектрального сканирования керна донных осадков озера Хорлакель (Западный Кавказ) в Лаборатории палеоархивов природной среды Института географии РАН и раскрывает возможности метода для создания на его основе детальных палеорекопструкций.

2. Материалы и методы

В Лаборатории палеоархивов природной среды ИГ РАН была создана установка для гиперспектральной съемки озерных кернов. Она состоит из гиперспектральной камеры, совместимого с ней сканера Specim LabScanner с галогеновым освещением и оборудования для прокатки длинных кернов. Используемая камера Specim FX10 работает в режиме линейного сканирования в видимой и ближней инфракрасной (VNIR) частях электро-

магнитного спектра (диапазон 400-1000 нм) с 448 спектральными каналами. Пространственное разрешение полученных данных составляет 229 мкм, среднее спектральное разрешение – 5,5 нм. Керн сканировался в виде восьми участков по 40 см с перекрытием около 10 см.

Для обработки, калибровки, сшивания и анализа гиперспектральных данных специалистами ИГ РАН был разработан специализированный программный продукт. Изображения корректировались по черному (закрытый объектив) и белому (калибровочный образец от производителя) стандартам. Из керна выбирались центральные участки, которые далее сшивались с помощью метода наименьших квадратов для значений отражательной способности на перекрывающихся участках. Трещины, возникшие в результате усыхания керна, удались и не использовались в дальнейшем анализе. Итоговые данные представляют собой гиперкуб – трехмерный массив данных с двумя измерениями в виде длины и ширины изображения в пикселях и третьим спектральным измерением (максимальное число каналов – 448).

Озеро Хорлакель (43°29'36»N; 42°13'05»E, 2063 м н.у.м) расположено в 20 км к запад-северо-западу от массива Эльбруса и примерно в 60 км от Главного Кавказского хребта. Средняя глубина озера 3,8 м, максимальная – 8 в центральной части. Керн HOR1 использован нами в качестве пилотного объекта для гиперспектрального сканирования благодаря своему литостратиграфическому разно-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: alexandrin@igras.ru (М.Ю. Александрин)

Поступила: 06 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024



образию – керн сложен чередующимися участками тонкослоистых глин и сапропеля с различными спектральными свойствами. Кроме того, для керна HOR1 был сделан ряд лабораторных анализов – как на дискретных образцах (ИГ РАН), так и высокоразрешающий сканирующий микро-РФА анализ с помощью рабочей станции GEOTEK MSCL-XYZ (Институт океанологии РАН). Возрастная модель керна HOR1 надежно закреплена с помощью одиннадцати радиоуглеродных (AMS) датировок и охватывает период 6700-1500 календарных лет назад. Особенности стока наносов на водосборе озера Хорлакель были также детально изучены (Шварев и др., 2023).

3. Результаты и обсуждение

В ходе предыдущих исследований в пределах видимой – ближней ИК частей спектра был обнаружен ряд спектральных индексов, косвенно отражающих вариации тех или иных свойств в осадке и, соответственно, условий и процессов осадконакопления. В настоящей работе рассматривается самый достоверный из них – увеличенное поглощение (или понижение значения отражательной способности) в части электромагнитного спектра, соответствующей длине волн в районе 670 нм. Известно, что хлорофилл *a*, необходимый большинству фотосинтезирующих организмов, и продукты его распада поглощают свет в красной части спектра, а зеленый свет в основном отражают. Спектральный индикатор содержания хлорофилла *a* в осадке может быть посчитан путем подсчета глубины минимума в районе 670 нм на спектральной кривой (Relative absorption band depth – RABD670) или площади фигуры, образуемой этим минимумом (Relative absorption band area – RABA670) (Rein and Sirocko, 2002). Ряд исследований приводит крайне высокие коэффициенты корреляции между этими параметрами и концентрациями хлорофилла *a*, измеренной напрямую с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии (Wolfe et al., 2006). Общий подход состоит в том, что осадки с большим содержанием органического вещества будут иметь более высокие значения параметров RABD670 или RABA670 по сравнению с осадками преимущественно литогенного происхождения.

В настоящей работе мы рассматриваем потенциал спектральных производных хлорофилла *a* отражать вариации содержания органического вещества и автохтонной продуктивности в керне озера Хорлакель. Для этого мы провели корреляционный и многофакторный анализы набора данных, включающего значения параметров RABD670 и RABA670, концентрации элементов, полученные с помощью микро-РФА анализа, результаты лабораторных анализов (потери при прокаливании, магнитная восприимчивость, гранулометрический состав) – отдельно для данных высокого и низкого разрешения.

Результаты говорят об устойчивой связи наших спектральных индексов и других известных биогенных индикаторов. В частности, нами было

установлено, что параметры RABD670 или RABA670 статистически значимо связаны с концентрацией брома в осадке – другим биогенным индикатором, который ранее был использован нами для реконструкции теплообеспеченности на Кавказе с высоким разрешением (Alexandrin et al., 2023). Также статистически значимые положительные связи отмечены для соотношения некогерентного/когерентного рассеяния рентгеновских лучей (также используется в качестве косвенного индикатора количества органического вещества) и массовыми потерями при прокаливании (коэффициенты ранговой корреляции Спирмена 0.48-0.77). Кроме того, отмечаются высокие отрицательные значения этих коэффициентов для связи параметров RABD670 или RABA670 и концентраций литогенных элементов и магнитной восприимчивости (-0.62–-0.86)

4. Выводы

Проделанная работа позволяет использовать параметры RABD670 или RABA670 в качестве индикаторов вариаций органического вещества в осадке и автохтонной продуктивности. В случае керна озера Хорлакель временное разрешение для кривых этих параметров составляет менее одного года. Настолько высокое разрешение может реконструкцию отдельных кратковременных событий, расшифровку периодических событий и форсингов, наряду с общими реконструкциями долгопериодной изменчивости.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Авторы благодарят Дмитрия Борисова (ИО РАН) за проведение микро-РФА анализа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Шварев С.В., Александрин М.Ю., Иванов М.М. и др. 2023. Реконструкция особенностей формирования стока наносов на водосборе оз. Хорлакель (северный Кавказ) за последние 8 тыс. лет (по геоморфологическим и лито-стратиграфическим данным). Геоморфология и палеогеография 3: 81-107. DOI: [10.31857/S2949178923020081](https://doi.org/10.31857/S2949178923020081)

Alexandrin M.Y., Solomina O.N., Darin A.V. 2023. Variations of heat availability in the Western Caucasus in the past 1500 years inferred from a high-resolution record of bromine in the sediment of Lake Karakel. Quaternary International 664: 20-32.

Rein B., Sirocko F. 2002. In-situ reflectance spectroscopy-analysing techniques for high-resolution pigment logging in sediment cores. International Journal of Earth Sciences 91: 950-954.

Wolfe A.P., Vinebrooke R.D., Michelutti N. et al. 2006. Experimental calibration of lake-sediment spectral reflectance to chlorophyll a concentrations: methodology and paleolimnological validation. *Journal of Paleolimnology* 36: 91-100. DOI: [10.1007/s10933-006-0006-6](https://doi.org/10.1007/s10933-006-0006-6)