

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ / AEROSPACE RESEARCH OF THE EARTH, PHOTOGRAMMETRY

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.57>

РЕЗУЛЬТАТ МОНИТОРИНГА ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Научная статья

Гордиенко А.С.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Российская Федерация

\* Копирующий автор (gordienko.fot[at]gmail.com)

**Аннотация**

В статье приведены результаты мониторинга береговой линии озера Байкал в районе устья реки Тья (бухта Сеногда) и устья реки Слюдянка по космическим снимкам. Описаны проблемы данных районов, которые заключаются в интенсивном развитии водорослей спиригиры. Представлены результаты экспериментов по мониторингу. Выполнен расчет индексных изображений и проанализированы значения индексов на загрязненной территории. Выявлено наличие водорослей в указанных районах и отмечена тенденция по увеличению их концентрации. Данные, полученные в результате экспериментов, подтверждены информацией из открытых источников. Сделан вывод об эффективности применения индексных изображений при выявлении результатов негативного влияния на объекты гидрографии, а также о том, что для данных целей достаточно трех стандартных спектральных каналов (R, G, B).

**Ключевые слова:** водоросли, Байкал, космические снимки, мониторинг, Sentinel-2.

RESULT OF MONITORING OF LAKE BAIKAL BASED ON SPACE IMAGES

Research article

Gordienko A.S.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

\* Corresponding author (gordienko.fot[at]gmail.com)

**Abstract**

The article presents the results of monitoring the shoreline of Lake Baikal in the area of the Tyua River estuary (Senogda Bay) and the Slyudyanka River estuary using space images. The problems of these areas are described, which consist in intensive development of spirogyra algae. The results of monitoring experiments are presented. Index images were calculated and index values in the polluted area were analysed. The presence of algae in the indicated areas was detected and a tendency to increase their concentration was noted. The data obtained as a result of experiments are confirmed by information from open sources. The conclusion is made about the efficiency of index images application in detecting the results of negative influence on hydrographic objects, as well as about the fact that three standard spectral channels (R, G, B) are sufficient for these purposes.

**Keywords:** algae, Baikal, space images, monitoring, Sentinel-2.

**Введение**

Актуальность данного исследования заключается в том, что в озере Байкал содержится 20% мировых запасов пресной воды, а антропогенное воздействие путем выбросов отходов жизнедеятельности человека, турбаз и очистных сооружений негативно влияют на экологическую ситуацию озера. Использование данных дистанционного зондирования позволяет оценить динамику негативных изменений состояния озера, что предоставит возможность устранить причину экологической проблемы и частично заменить полевые исследования.

Как известно, на участках залив Листвяничный, побережье Северного Байкала (участок бухта Сеногда – устье р. Тья) и Байкальск происходит массовое распространение спиригиры, которая захватила около 60% мелководья Байкала. Данная водоросль не только угрожает другим водорослям в водах Байкала, но и захватывает прибрежную зону, которая регулярно покрывается слоем отмерших водорослей.

По подсчетам ученых, сырая биомасса гнилых водорослей на данном участке может достигать 90 килограмм на квадратный метр. Основными причинами распространения является попадание в озеро отходов жизнедеятельности человека, которыми водоросль и питается, а также очистные сооружения, попадающие в стоки из железнодорожного депо, а оттуда идут прямо в байкальскую воду [1], [2], [3], [4].

Современное развитие данных дистанционного зондирования Земли, их доступность и оперативность получения активно используются в различных сферах деятельности человека. Документальность и независимость получаемой информации, позволяют получать достоверные сведения об объектах земной поверхности их метрических и качественных характеристиках. Снимки не заменяют данные полевых обследований, но существенно сократят объем работ и незаменимы в труднодоступных районах.

Цель данного исследования – мониторинг береговой линии озера Байкал по космическим снимкам, с целью обнаружения массового распространения водорослей спиригиры.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить расчет индексных изображений (индекс мутности и концентрации хлорофилла) по временному ряду космических снимков;
- выявить значения индексов, соответствующие наличию водорослей в воде;

- осуществить анализ результатов;
- сформулировать выводы и рекомендации.

### Методы и принципы исследования

Космические снимки для выполнения работы были получены съемочной системой Sentinel-2 на даты 22.06.2017, 17.07.2018, 17.06.2019, 06.07.2020 и 12.06.2021. Территория исследования – устье реки Тья (бухта Сеногда) и устье реки Слюдянка.

Как показывают многочисленные исследования [5], [6], [9], [10], эффективным инструментом для оперативного мониторинга воздействия негативных факторов на окружающую среду, по данным дистанционного зондирования Земли, является использование индексных изображений. Формулы расчета индексов основаны на особенностях зависимости коэффициентов спектральной яркости от диапазона спектра. Выделяют вегетационные, почвенные, водные и другие индексы.

Существует множество различных индексов, одними из самых распространенных являются нормализованный вегетационный индекс NDVI для определения состояния наземной растительности и нормализованный разностный индекс воды NDWI для обнаружения водных объектов [8].

Индекс NDVI рассчитывается по формуле

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где *NIR* – канал ближнего инфракрасного спектра отражения;

*RED* – канал красного диапазона видимого спектра отражения.

Индекс NDWI рассчитывается по формуле

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR), \quad (2)$$

где *SWIR* – дальний инфракрасный канал.

Для выявления взвесей в водоемах, часто, используют индекс мутности (*Mut*). Данный индекс показывает помехи в прохождении света через толщу воды, вызванные взвешенными материалами. Чем больше количество всех взвешенных твердых частиц в воде, тем выше измеренная мутность. Она включает в себя грязь, осадок, чрезмерный рост водорослей, фитопланктона, глины и ила, может быть вызвана стоком земель, загрязнением и эрозией береговой линии.

Индекс мутности *Mut* рассчитывается по формуле

$$Mut = BLUE / (BLUE + GREEN + RED), \quad (3)$$

где *BLUE* – синий канал видимого спектра;

*GREEN* – зелёный канал видимого спектра.

Для определения развития фитопланктона и высших водных растений применяется индекс концентрации хлорофилла. Максимальные значения которого соответствуют участкам, занятым зарослями водных растений, это свидетельствует о том, что на данной территории происходит обильное развитие фитопланктона, что является главной причиной повышенной мутности.

Индекс концентрации хлорофилла *Hlor* рассчитывается по формуле

$$Hlor = (BLUE - RED) / GREEN. \quad (4)$$

### Основные результаты

Для всех исходных снимков был выполнен расчет индексов мутности и концентрации хлорофилла. Примеры, полученных индексных изображений, представлены на рис.1 и 2.

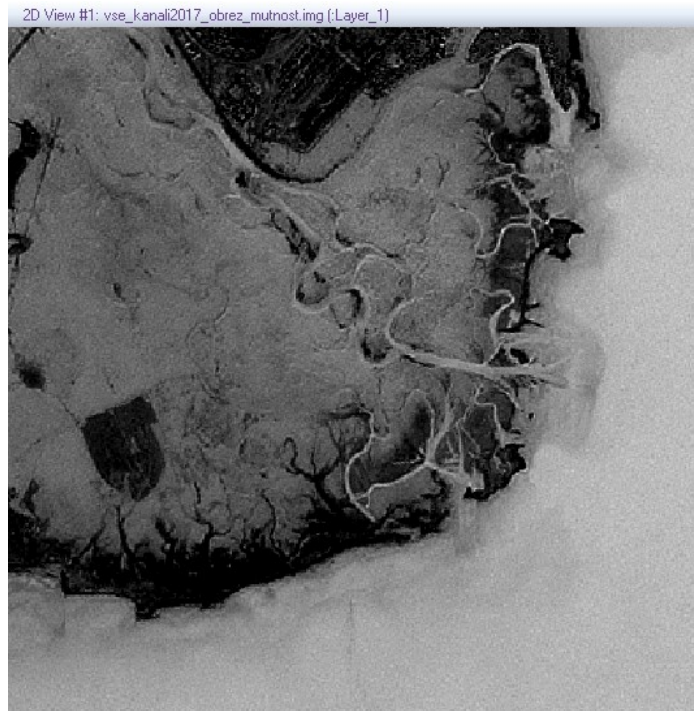


Рисунок 1 - Индексное изображение мутности 22 июня 2017  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.57.1>

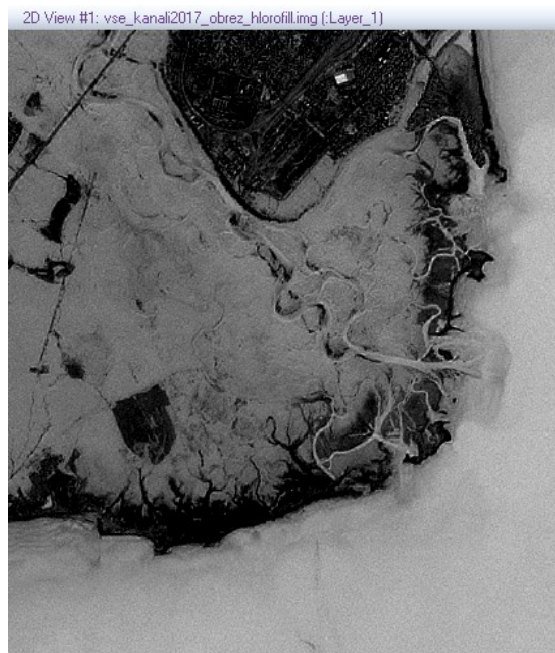


Рисунок 2 - Индексное изображение концентрации хлорофилла 22 июня 2017  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.57.2>

Далее на основе полученных данных, априорной информации о значениях индексов и визуальном дешифрировании, были выявлены диапазоны значений индексов, соответствующие наличию водорослей в воде (рис. 3).

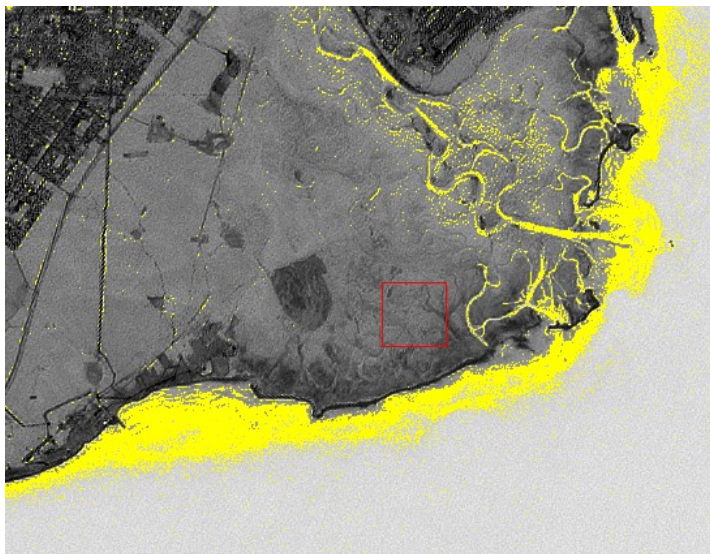


Рисунок 3 - Результат выявления водорослей (желтым) на основе значений индекса мутности (устье реки Тья 6 июля 2020)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.57.3>

Анализ, полученных разновременных индексных изображений, показал, что на данной территории происходит обильное развитие фитопланктона, что является главной причиной повышенной мутности. При этом наблюдается повышение концентрации водорослей с каждым годом. Об этом свидетельствует увеличение значений индексов мутности и концентрации хлорофилла.

На основе полученных индексных изображений были определены максимальные, средние и минимальные значения индексов на указанной территории в период с 2017 по 2021 года. Графики изменения значений индексов представлены на рис. 4–6.

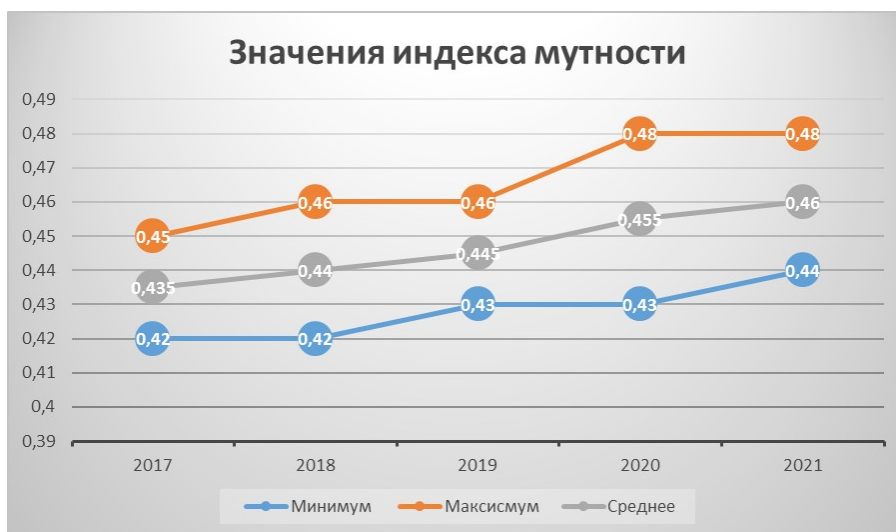


Рисунок 4 - График изменения значений индекса мутности в период с 2017 по 2021 года

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.57.4>



Рисунок 5 - График изменения значений индекса концентрации хлорофилла в период с 2017 по 2021 года  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.57.5>



Рисунок 6 - График изменения средних значений индексов мутности и концентрации хлорофилла в период с 2017 по 2021 года  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.57.6>

Полученные графики иллюстрируют, что с каждым годом развитие фитопланктона имеет тенденцию к увеличению, но в 2021 году значения индексов меняется незначительно. Это можно объяснить тем, что в 2021 году «Росводресурсами» было проведено мероприятие по очистке от водорослей рода спиригира северного побережья озера Байкал [3].

### Заключение

Таким образом, исследования показали, что для выявления водорослей в воде и их развития в разные периоды времени, для оперативного экологического мониторинга эффективно использовать данные дистанционного зондирования Земли. В данной работе использовались снимки, полученные съемочной системой Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м. Это накладывает ограничения на точность и подробность получаемых данных. Так как в ходе экспериментов использовались только два индекса (мутности и концентрации хлорофилла), где задействованы данные из трех диапазонов спектра (синий, зеленый, красный), то это существенно расширяет ассортимент данных дистанционного зондирования. А соответственно, есть возможность применять снимки высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, что позволит повысить детальность и точность выявления влияния различных факторов на компоненты окружающей среды.

Кроме того, как показывают результаты, с помощью мероприятий по очистке береговой зоны, можно уменьшить размножение нитчатых водорослей спиригиры и сохранить древнейший источник питьевой воды. Помимо очистки береговой зоны, размножение можно предотвратить, перестав сливать в озеро загрязненные стоки. Жителям и

туристам необходимо соблюдать чистоту при отдыхе на берегу Байкала, а также не использовать фосфорсодержащие моющие средства, действующие как удобрения для спиригиры.

Жителям и туристам необходимо соблюдать чистоту при отдыхе на берегу Байкала, а также не использовать фосфорсодержащие моющие средства, действующие как удобрения для спиригиры.

### Благодарности

Автор выражает признательность Рукавишниковой Е. А. за оказанную помощь при проведении данного исследования.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Acknowledgement

The author expresses their gratitude to E. A. Rukavishnikova for the assistance in conducting this study.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

## Список литературы / References

1. Верховина Е. В. Устойчивость бактерий озера Байкал к антибиотикам как показатель антропогенной нагрузки на экосистему / Е. В. Верховина, В. А. Верховина, О. А. Белых // Известия Байкальского государственного университета. — 2021. — 2. — с. 241-247.
2. Дзювина О. И. Динамика изменения концентрации загрязняющих веществ в поверхностных водах Иркутской области / О. И. Дзювина // Наукосфера. — 2021. — 5-2. — с. 9-12.
3. Тахтеев В. В. О химическом составе воды в малых притоках и прибрежной зоне озера Байкал в период экологического кризиса / В. В. Тахтеев, Е. Р. Хадеева, И. О. Еропова, О. Г. Лопатовская // Водные ресурсы. — 2020. — 3. — с. 291-301.
4. Шевелева Н. Г. Динамика зоопланктонных сообществ мелководья Северного Байкала во время цветения воды из-за обилия зеленых нитчатых водорослей *Spirogyra* spp. (Chlorophyta, Zygnematorphyceae) в 2013-2014 гг / Н. Г. Шевелева, О. А. Тимошкин, Е. А. Мишарина // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. — 2017. — 4. — с. 35-44.
5. Гордиенко А. С. Исследование возможности выявления негативного воздействия разливов нефти на окружающую растительность по данным дистанционного зондирования земли / А. С. Гордиенко // Вестник СГУГиТ. — 2021. — 6. — с. 48-55.
6. Калиева А. А. Мониторинг нарушений природной среды техногенными процессами при дешифрировании космоснимков / А. А. Калиева, А. Т. Байшуаков, А. В. Ермиенко // Интерэкспо Гео-Сибирь; — Вып. 4. — 2019: СГУГиТ, 2019. — с. 64-72.
7. Лаврова О. Ю. Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище / О. Ю. Лаврова, Д. М. Соловьев, А. Я. Строчков, В. Д. Шендрик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2014. — 11. — с. 54-72.
8. Морозова В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования / В. А. Морозова // Современные проблемы территориального развития. — 2019. — 2. — с. 9-11.
9. Опарин В. Н. О комплексной оценке состояния окружающей среды по данным дистанционного зондирования Земли в регионах с высокой техногенной нагрузкой / В. Н. Опарин, В. П. Потапов, О. Л. Гиниятуллина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — 6. — с. 199-209.
10. Гордиенко А. С. Исследование состояния окружающей среды в районе нефтеразработок по космическим снимкам / А. С. Гордиенко, А. В. Ткач // Вестник СГУГиТ. — 2022. — 27. — с. 55-63.

## Список литературы на английском языке / References in English

1. Verhozina E. V. Ustojchivost' bakterij ozera Bajkal k antibiotikam kak pokazatel' antropogennoj nagruzki na ekosistemu [Resistance of Bacteria of Lake Baikal to Antibiotics as an Indicator of Anthropogenic Load on the Ecosystem] / E. V. Verhozina, V. A. Verhozina, O. A. Belyh // Proceedings of the Baikal State University. — 2021. — 2. — p. 241-247. [in Russian]
2. Dzjuvina O. I. Dinamika izmenenija kotsentratsii zagrjaznjajuschih veshchestv v poverhnostnyh vodah Irkutskoj oblasti [Dynamics of Changes in the Concentration of Pollutants in the Surface Waters of the Irkutsk Region] / O. I. Dzjuvina // Sciencosphere. — 2021. — 5-2. — p. 9-12. [in Russian]
3. Tahteev V. V. O himicheskom sostave vody v malyh pritokah i pribrezhnoj zone ozera Bajkal v period ekologicheskogo krizisa [On the Chemical Composition of Water in Small Tributaries and the Coastal Zone of Lake Baikal during the Ecological Crisis] / V. V. Tahteev, E. R. Hadeeva, I. O. Eropova, O. G. Lopatovskaja // Water Resources. — 2020. — 3. — p. 291-301. [in Russian]
4. Sheveleva N. G. Dinamika zooplanktonnyh soobschestv melkovod'ja Severnogo Bajkala vo vremja tsvetenija vody iz-za obilija zelenyh nitchatyh vodoroslej Spirogyra spp. (Chlorophyta, Zygnematorphyceae) v 2013-2014 gg [Dynamics of Zooplankton Communities in the Shallow Waters of Northern Baikal during Water Blooming due to the Abundance of Green

Filamentous Algae *Spirogyra* spp. (Chlorophyta, Zygnematophyceae) in 2013-2014] / N. G. Sheveleva, O. A. Timoshkin, E. A. Misharina // Bulletin of the Moscow Society of Nature Testers. Department of Biological. — 2017. — 4. — p. 35-44. [in Russian]

5. Gordienko A. S. Issledovanie vozmozhnosti vyjavlenija negativnogo vozdejstvija razlivov nefiti na okruzhajuschuju rastitel'nost' po dannym distantsionnogo zondirovanija zemli [Investigation of the Possibility of Identifying the Negative Impact of Oil Spills on the Surrounding Vegetation according to Remote Sensing of the Earth] / A. S. Gordienko // Bulletin of SSUGT. — 2021. — 6. — p. 48-55. [in Russian]

6. Kalieva A. A.. Monitoring narushenij prirodnoj sredy tehnogennymi protsessami pri deshifirovanii kosmosnimkov [Monitoring of Violations of the Natural Environment by Technogenic Processes during the Decoding of Satellite Images] / A. A. Kalieva, A. T. Bajshuakov, A. V. Ermienko // Interexpo Geo-Siberia; — Issue 4. — 2019: SGUGiT, 2019. — p. 64-72. [in Russian]

7. Lavrova O. Ju. Sputnikovij monitoring intensivnogo tsvetenija vodoroslej v Rybinskom vodohranilische [Satellite Monitoring of Intensive Algal Blooming in the Rybinsk Reservoir] / O. Ju. Lavrova, D. M. Solov'ev, A. Ja. Stochkov, V. D. Shendrik // Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. — 2014. — 11. — p. 54-72. [in Russian]

8. Morozova V. A. Raschet indeksov dlja vyjavlenija i analiza harakteristik vodnyh ob'ektov s pomosh'ju dannyh distantsionnogo zondirovanija [Calculation of Indices for Identification and Analysis of Characteristics of Water Bodies Using Remote Sensing Data] / V. A. Morozova // Modern Problems of Territorial Development. — 2019. — 2. — p. 9-11. [in Russian]

9. Oparin V. N. O kompleksnoj otsenke sostojanija okruzhajushej sredy po dannym distantsionnogo zondirovanija Zemli v regionah s vysokoj tehnogennoj nagruzkoj [On a Comprehensive Assessment of the State of the Environment according to Remote Sensing of the Earth in Regions with High Anthropogenic Load] / V. N. Oparin, V. P. Potapov, O. L. Ginijatullina // Physical and Technical Problems of Mineral Development. — 2014. — 6. — p. 199-209. [in Russian]

10. Gordienko A. S. Issledovanie sostojanija okruzhajushej sredy v rajone nefterazrabotok po kosmicheskim snimkam [Study of the State of the Environment in the Area of Oil Production from Satellite Images] / A. S. Gordienko, A. V. Tkach // Bulletin of SSUHT. — 2022. — 27. — p. 55-63. [in Russian]