

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ОЗЕРЕ ТАЙХУ ПО ДАННЫМ КИТАЙСКОГО СПУТНИКА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ HJ-V1

С. Жун¹⁾, Н. А. Шестаков²⁾

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, email: marshmallowsnicole@gmail.com*

²⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь*

В работе представлены результаты расчёта концентрации хлорофилла в воде оз. Тайху (провинция Цзянсу, Китай) на основе анализа мультиспектральных спутниковых данных HJ-1B (CCD1) и данных отбора проб воды. Определение концентрации хлорофилла выполнялось путём расчёта относительного вегетационного индекса RVI по спутниковому изображению и инвертированию индексных значений в значения концентрации с применением метода подгонки кривых в ENVI 5.6.

Ключевые слова: мониторинг качества воды; концентрация хлорофилла; озеро Тайху; данные ДЗЗ; HuanJing-1B.

WATER QUALITY MONITORING OF TAIHU LAKE BASED ON HJ-V1 CHINESE SATELLITE REMOTE SENSING DATA

X. Rong¹⁾, N. A. Shestakov²⁾

¹⁾ *Belarusian State University, Niezaliežnasci Av., 4,
220030, Minsk, Belarus, marshmallowsnicole@gmail.com*

²⁾ *Belarusian State University, Niezaliežnasci Av., 4,
220030, Minsk, Belarus*

The article presents the results of calculating the concentration of chlorophyll in the water of Taihu lake (Jiangsu Province, China) based on analysis of HJ-1B (CCD1) multi-spectral satellite data and water sampling data. Chlorophyll concentration was calculated with applying of the Relative Vegetation Index (RVI) to the satellite image and inverting index values into concentration values using the curve fitting method in ENVI 5.6.

Keywords: water quality monitoring; chlorophyll concentration; Lake Taihu; remote sensing data; HuanJing-1B.

Одним из актуальных направлений практического применения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является экологический мониторинг водных объектов. Сохранение и поддержание водных ресурсов и биологического разнообразия водных экосистем относится к приоритетным условиям национального устойчивого развития государств, в

особенности Китайской Народной Республики – страны с колоссальными масштабами промышленного производства, высокой численностью и плотностью населения, существенными экологическими проблемами. Порядка 75 % поверхностных вод Китая характеризуются высокой степенью загрязнения [1]. В связи с чем проведение исследований состояния и качества поверхностных вод как никогда актуально. Государственная поддержка развития аэрокосмических технологий в стране обеспечивает исследования в области экологии современной, оперативной и надёжной информацией об объектах земной поверхности в виде данных ДЗЗ. При этом наличие сегмента мультиспектральных данных дистанционного зондирования, полученных в оптическом диапазоне, доступность и возможность применения специализированного программного обеспечения, поддерживающего обработку снимков китайских спутников, формируют прочную основу для реализации исследований экологической направленности с применением дистанционных методов.

Цель исследования заключалась в анализе качества воды в оз. Тайху на основе мультиспектральных спутниковых данных HJ-V1.

Работа была выполнена во время прохождения студентом кафедры геодезии и космоаэрокартографии ФГиГ БГУ С. Жуном стажировки в китайской компании информационных технологий PIESAT (Aerospace Hongtu Information Technology Co. Ltd.) [2] в г. Пекине с 30.06.2023 г. по 16.09.2023 г.

Дистанционный мониторинг качества воды осуществлялся на примере оз. Тайху, расположенного в Восточном Китае (юг провинции Цзянсу). Тайху – 3-е по величине пресноводное озеро в Китае. Площадь водного зеркала составляет 2 200–2 500 км². Озеро является мелководным, максимальная глубина летом – 12 м, средняя глубина за год – 3,1 м. Озёрная котловина сформировалась около 4 500 лет назад на месте ударного кратера. Озеро связано с Великим китайским каналом, крупнейшей рекой Евразии – Янцзы, даёт исток для 224 рек. Площадь водосборного бассейна составляет порядка 35 000 км² (в озеро впадает 70 рек). В прибрежных районах развиты судоходство, рыболовство, туризм, по берегам расположены порты Шадуньган и Сюйкоуган. Водоём характеризуется высокой степенью эвтрофикации, что весьма актуально для целей исследования [3].

В качестве объекта исследования выступала вода оз. Тайху в пределах поверхностного слоя (эпилимниона). Предмет исследования – концентрация в воде хлорофилла *a*, содержащегося в озёрном фитопланктоне.

В качестве исходных данных ДЗЗ были использованы мультиспектральные спутниковые данные, полученные с космического аппарата HJ-

1В (CCD1). HuanJing-1 А, В, С (сокращённо – HJ-1A, HJ-1B, HJ-1C) – серия китайских спутников ДЗЗ, запущенных в 2008 и 2012 годах с целью мониторинга окружающей среды, прогнозирования и ликвидации последствий стихийных бедствий [4]. Спутник HJ-1B оснащён 2-мя съёмочными системами: широкоугольной камерой Wide View CCD Cameras (CCD1), производящей съёмку в 4-х зонах оптического диапазона (0,43–0,90 мкм), и инфракрасной мультиспектральной камерой Infrared Multispectral Scanner (IRMSS), регистрирующей данные в 4 зонах ИК-диапазона (0,75–1,10; 1,55–1,75; 3,50–3,90; 10,5–12,5 мкм) [5].

В работе использован мультиспектральный снимок HJ-1B (CCD1), полученный на исследуемую территорию за 06.10.2019 г. (рис. 1, таблица).



Рис. 1. Изображение озера Тайху на снимке HJ-1B (CCD1) за 06.10.2019 г. в синтезе каналов 3-2-1 (слева) и 4-3-2 (справа)

Параметры мультиспектрального спутникового изображения HJ-1B (CCD1)

Канал	Спектральное разрешение		Пространственное разрешение, м/пиксель
	$\lambda_{\text{центр}}$, мкм	Спектральная зона	
Band 1 (Blue)	0,475	синяя	30
Band 2 (Green)	0,560	зелёная	30
Band 3 (Red)	0,666	красная	30
Band 4 (NIR)	0,830	ближняя ИК	30
Дата съёмки	06.10.2019 г.	Система координат	WGS-84
Время съёмки	03:01:31,33	Проекция	UTM (Zone 51N)

Исследование проводилось на базе программного комплекса (ПК) ENVI версии 5.6 [6]. Для реализации цифровой обработки снимков HJ-1A/B (CCD) в ПК ENVI и повышения её эффективности, предварительно были установлены 2 дополнительных инструмента: «Инструмент поддержки данных китайских спутников» («China Satellites Support»); «Инструмент подгонки кривых» («Curve Fitting»). Технологическая схема обработки данных ДЗЗ HJ-1B (CCD1) представлена на рисунке 2.

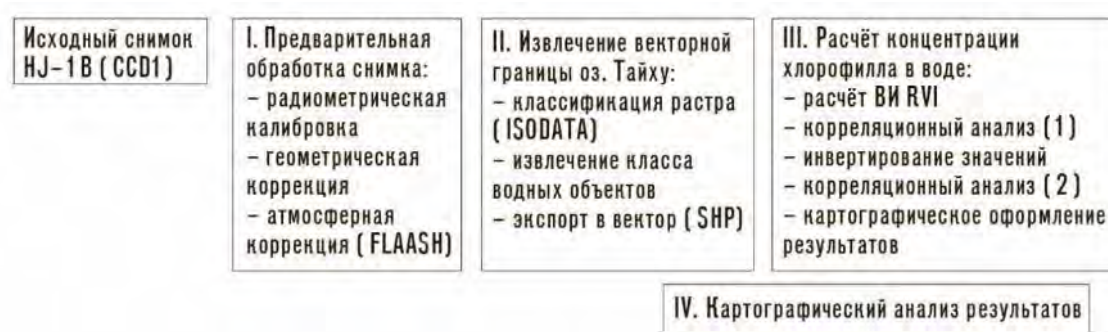


Рис. 2. Технологическая схема обработки данных ДЗЗ HJ-1B (CCD1) для мониторинга качества воды в оз. Тайху

Этап предварительной обработки данных ДЗЗ (preprocessing data) состоял из радиометрической калибровки, геометрической коррекции и атмосферной коррекции спутникового изображения.

Радиометрическая калибровка выполнялась в ENVI 5.6 с помощью инструмента «Radiometric Calibration» [7] и была направлена на устранение технических помех сенсора, пересчёт и реорганизацию структуры хранения спектральных данных снимка для дальнейшего проведения атмосферной коррекции по методу FLAASH.

Геометрическая коррекция с использованием инструмента «Image Registration Workflow» проводилась по методу опорных точек на основе предварительно подготовленного спутникового изображения Landsat-8 (OLI) на территорию исследования.

Для проведения *атмосферной коррекции* использовался модуль «FLAASH Atmospheric Correction». В качестве задаваемой модели атмосферы была выбрана «Тропическая» («Tropical») [7]. Сравнение кривых спектральной яркости водной растительности, полученных из изображения до и после атмосферной коррекции, представлено на рисунке 3.

На основе неконтролируемой классификации изображения по методу ISODATA была получена растровая маска, ограничивающая водную поверхность оз. Тайху (из класса водных объектов), по изображению которой была построена векторная граница береговой линии озера (рис. 4).

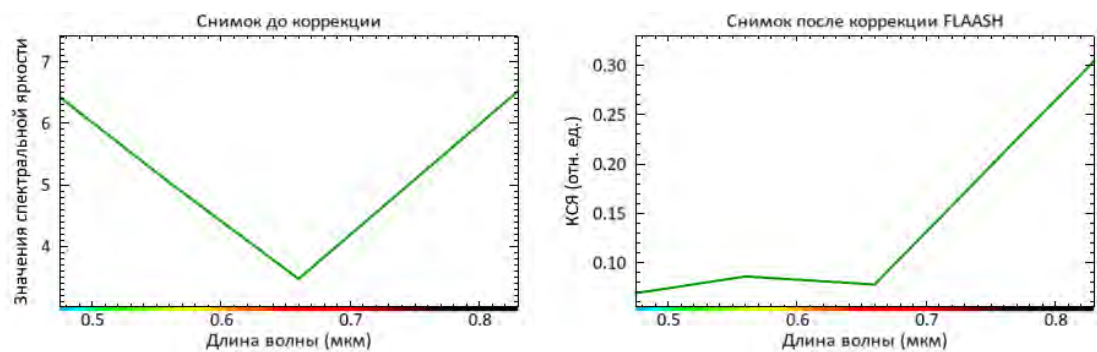


Рис. 3. Кривые спектральной яркости водной растительности, полученные из изображения до (слева) и после (справа) атмосферной коррекции методом FLAASH

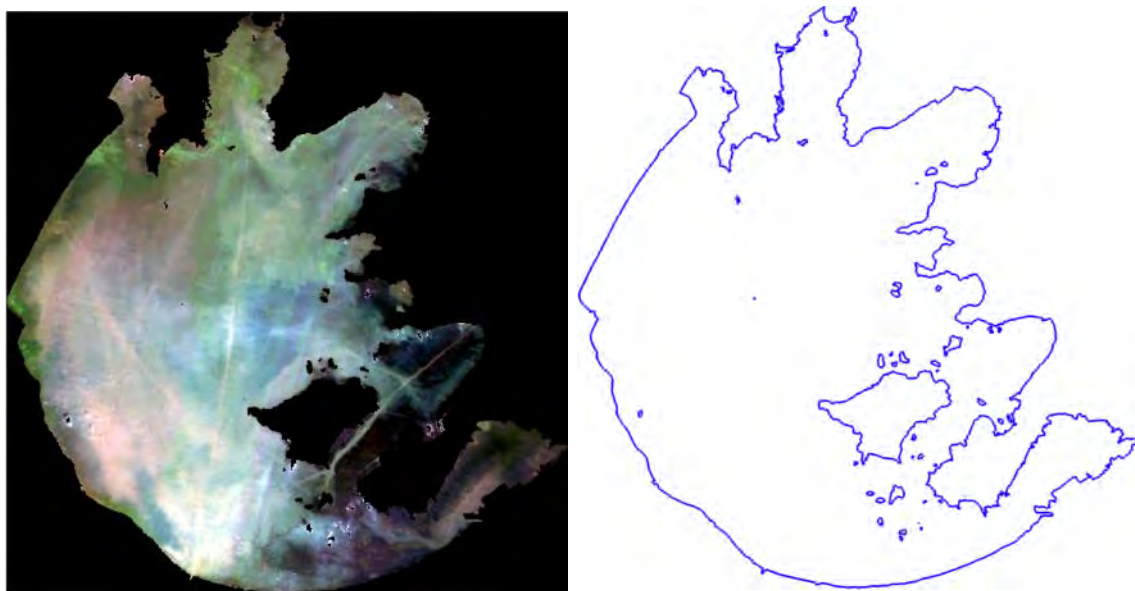


Рис. 4. Получение векторной границы оз. Тайху (справа) из слоя-маски (слева)

Одним из главных показателей гидробиологического анализа состояния водоёмов является концентрация в воде хлорофилла формы *a* ($C_{55}H_{72}Mg_1O_5N_4$), характеризующая, с одной стороны, уровень развития первичных планктонных продуцентов (фитопланктона) и являющаяся, с другой стороны, основным критерием определения степени биогенной нагрузки и трофности водных объектов [8]. Вместе с тем, данный показатель находит непосредственное отражение на материалах ДЗЗ, что даёт возможность выполнять мониторинг качества воды поверхностных водоёмов дистанционными методами. В случае, когда концентрация хлорофилла в воде высокая, наблюдается снижение спектральной яркости водной поверхности в синей зоне спектра и её увеличение – в зелёной, красной и инфракрасной зонах.

Определение концентрации хлорофилла *a* с использованием сопряжённых данных (данных ДЗЗ и данных наземных измерений) осуществлялось в 4 этапа:

- 1) расчёт относительного вегетационного индекса RVI по данным ДЗЗ;
- 2) валидация (контроль) индексных значений по результатам наземных измерений (точки отбора проб) путём проведения корреляционного анализа;
- 3) «подгонка» индексных значений с использованием инструмента подгонки кривой «Curve Fitting»;
- 4) картографический анализ результатов.

Относительный вегетационный индекс RVI (Ratio vegetation index) является наиболее широко распространённым вегетационным спектральным индексом, рассчитываемым как соотношение значений спектральной яркости, регистрируемых в ближней ИК-зоне спектра (NIR), к значениям, полученным в красной зоне (Red) [9]. Диапазон значений индекса варьируется от «0» до «+∞». Расчёт индекса осуществлялся в ENVI 5.6 через инструмент «Band Math». Полученные значения индекса были экспортированы в Microsoft Office Excel и подготовлены для дальнейшего анализа.

На основе проведения *корреляционного анализа* была установлена *прямая линейная связь* между индексными значениями, рассчитанными по данным ДЗЗ и значениями, полученными в результате отбора проб воды в оз. Тайху. Величина *коэффициента детерминации* R^2 составила 0,78, что указывает на высокую степень тесноты связи между значениями, полученными дистанционными (спутниковыми) и наземными методами.

С использованием инструмента подгонки кривой «Curve Fitting» в ENVI 5.6 было выполнено инвертирование значений индекса RVI в значения концентрации хлорофилла *a* в воде (мг/л) с повторным проведением корреляционного анализа (рис. 5). Величина *коэффициента детерминации* R^2 при анализе с использованием инвертированных значений составила 0,89.

По завершении математико-статистического анализа данных был выполнен экспорт растрового изображения, содержащего инвертированные индексные значения RVI, в среду ГИС ArcGIS (ArcMap 10.7) для *картографического оформления результатов* (рис. 6).

В ходе анализа значений концентрации хлорофилла *a* было установлено, что среднее содержание хлорофилла в воде оз. Тайху по данным ДЗЗ за 06.10.2019 г. составило 0,14–16 мг/л. Максимальная концентрация – 0,27–0,30 мг/л, минимальная – 0,03–0,06 мг/л. Значения концентрации хлорофилла в воде указывают на сильную эвтрофикацию вод оз. Тайху.

На основе картографического анализа полученных результатов установлены закономерности в пространственном распределении планктонных продуцентов (фитопланктона): максимальные значения концентрации хлорофилла *a* отмечаются в прибрежных районах, в особенности в северо-

западной (прибрежные зона г. Уси) и юго-восточной (прибрежная зона г. Сучжоу и его пригородов, а также к востоку от о. Уфыньшань) частях; минимальные – в центральной части озера.

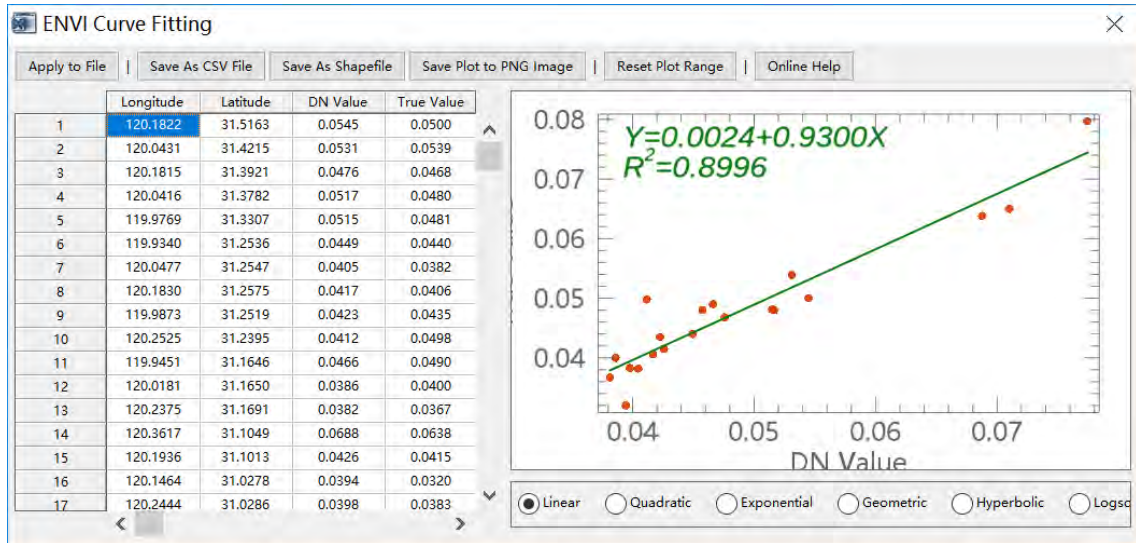


Рис. 5. Сопоставление значений концентрации хлорофилла а, полученных в результате инвертирования индексных значений RVI (поле «DN Value») и наземных измерений в точках отбора проб (поле «True Value»)

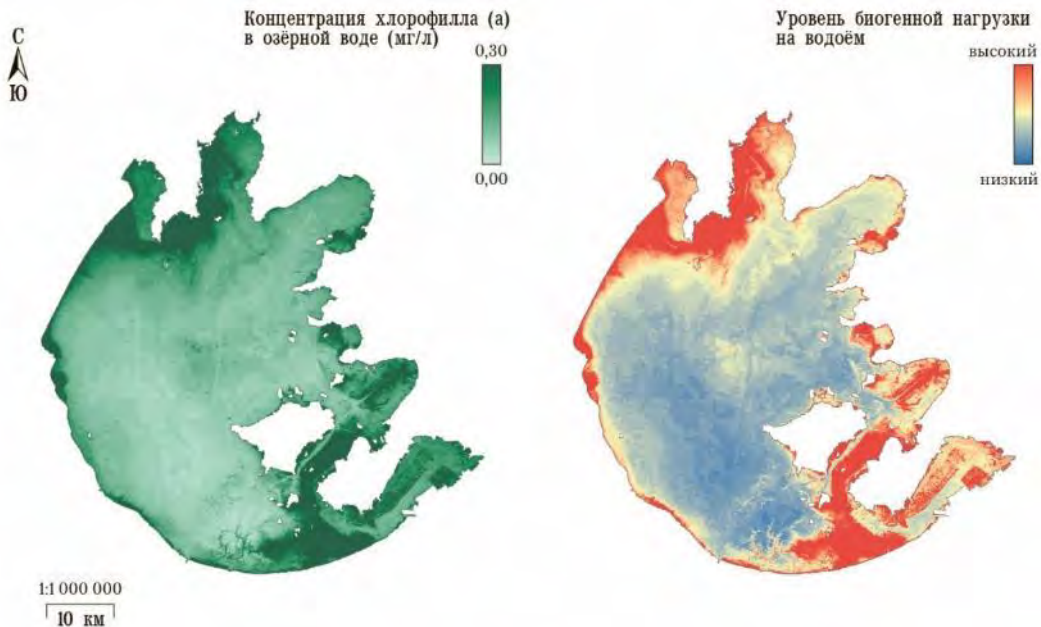


Рис. 6. Распределение в оз. Тайху концентрации хлорофилла (слева) и биогенной нагрузки (справа). Масштаб 1:1 000 000

Высокий уровень содержания хлорофилла в воде указывает также на *повышенную биогенную нагрузку на водоём*. Повышению эвтрофикации озера в значительной мере способствует загрязнение воды в самом озере и впадающих в него реках, обусловленное активным развитием промышленности, сельского хозяйства, водного транспорта, ростом численности населения. Порядка 40 % площади поверхности озера относится к *зоне высокой биогенной и антропогенной нагрузки*.

Таким образом, использование мультиспектральных спутниковых данных HJ-1B (CCD1) позволяет осуществлять мониторинг качества воды поверхностных водоёмов с высоким уровнем эвтрофикации и загрязнения на основе расчёта концентрации хлорофилла *a* по результатам анализа материалов ДЗЗ. Расчёт индексных показателей, таких как относительный вегетационный индекс RVI, позволяет устанавливать пространственные закономерности в распределении биологически активных элементов и загрязняющих веществ, а также выявлять области (очаги) повышенной биогенной и антропогенной нагрузки на водоёмы с целью оценки качества воды и выявления источников загрязнения.

Библиографические ссылки

1. *Храмчихин А.* Глава I. Основные проблемы и противоречия современного Китая, ограничивающие возможность его устойчивого развития // *Дракон проснулся? : внутренние проблемы Китая как источник китайской угрозы для России*. 2 изд. Москва: Издательство «Ключ-С», 2015. С. 18–21. 192 с.
2. Satellite Constellation Launch Countdown – piesat.cn [Electronic resources]. 2023. URL: <https://www.piesat.cn/en-us/> (date of access: 01.11.2023).
3. Озеро Тайху. ИНОЗ РАН – Электронный справочник «Озёра Земли» проекта «Электронная Земля» президиума РАН [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://archive.ph/20190921055447/http://limno.org.ru/win/wlake/1300.php>. (дата обращения: 01.11.2023).
4. HJ 1A, 1B (SMMS1) – Gunter’s Space Page [Electronic resources]. 2023. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/hj-1a.htm (date of access: 01.11.2023).
5. *Fan J.* Chinese Earth Observation Program and Policy. In: Onoda M., Young O. (eds) *Satellite Earth Observations and Their Impact on Society and Policy*. Springer, Singapore. 2017. P. 105–110. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-3713-9_8.
6. ENVI 5.6.1 Release Notes – NV5 Geospatial [Electronic resources]. 2023. URL: <https://www.nv5geospatialsoftware.com> (date of access: 01.11.2023).
7. *Тоназ А. А., Шестаков Н. А.* Цифровая обработка космических снимков : электронный учебно-методический комплекс для специальности: 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / БГУ, Фак. географии и геоинформатики, Каф. геодезии и космоаэрокартографии. Минск : БГУ, 2023. 95 с.
8. *Carlson R. E.* A trophic state index for lakes // *Limnol. Oceanog.* 1977. № 22 (2). P. 361–369.
9. *Черепанов А. С.* Вегетационные индексы // *ГЕОМАТИКА*. 2011. № 2. С. 98–102.