

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ Р. ДАЙ (ВЬЕТНАМ) ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ MSI SENTINEL 2 С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2020 г. Ле Хунг Чинь<sup>а</sup>, \*, В. Р. Заблоцкий<sup>б</sup>, Тхи Тху Нга Нгуен<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Технический университет им. Ле Куй Дон, Ханой, Вьетнам

<sup>б</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

\*e-mail: trinhlehung125@gmail.com

Поступила в редакцию 15.11.2019 г.

Концентрация взвешенных частиц в речной воде является важным параметром качества поверхностных вод. Многие исследования показали, что отражательная способность воды, полученная по данным дистанционного зондирования, тесно связана с концентрацией взвешенных в воде частиц. В работе представлены результаты определения концентрации взвеси в речной воде р. Дай (север Вьетнама) с использованием многозонального изображения MSI Sentinel 2 с пространственным разрешением 10 м. Величины коэффициентов яркости водной поверхности, рассчитанные на основе видимого и ближнего инфракрасного канала изображения MSI Sentinel 2, сравнивались с количеством взвеси, определенной в ходе анализа проб речной воды. В результате были построены регрессионные модели зависимости отражательной способности воды от содержания в ней взвешенных частиц. Среди всех моделей выбрано наиболее оптимальное линейное уравнение для проведения количественных оценок загрязненности поверхностных вод в данном речном бассейне. Полученные результаты могут быть использованы для мониторинга и оценки состояния речных вод в регионе с целью эффективного управления их качеством.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование земли, Sentinel 2, загрязнение воды, частицы взвеси, река Дай

**DOI:** 10.31857/S0205961420020037

#### ВВЕДЕНИЕ

Технологии дистанционного зондирования широко используются в мире для мониторинга и оценки качества поверхностной воды с высокой точностью, позволяя экономить время и деньги (Gholizadeh et al., 2016). В России первые публикации результатов о возможности изучения распространения взвесей по данным дистанционного зондирования появились в середине 1970-х и начале 1980-х гг. (Лабутина и др., 1976; Лабутина, Сафьянов, 1980). Первоначально, исследования были в основном направлены на изучении взаимосвязи между коэффициентами яркости, полученными на основе анализа спутниковых изображений с одной стороны и концентрацией взвеси и другими параметрами оценки качества воды с другой (Ritchie et al., 1976; Chen et al., 1992; Dekker et al., 1996).

Многие исследователи обнаружили линейную зависимость между спектральной отражательной способностью и такими параметрами качества поверхностных вод, как взвешенные частицы (TSS), хлорофилл-а (chlorophyll-a) (Ritchie et al., 1987; Ritchie et al., 1990; Chen et al., 1991; Moran

et al., 1992). В исследованиях (He, 2008; Doxaran, 2007; Guzman et al., 2009), авторы использовали многозональные спутниковые изображения с различным пространственным разрешением (Landsat, Spot, MODIS) для определения концентрации взвешенных веществ в поверхностных водах. Исследования с использованием данных многозональных изображений для оценки качества воды проведены в прибрежном районе Вьетнама Quang Ninh – Hai Phong (Luong, 2014). Также исследовались поверхностные воды озера Чиан, южная часть Вьетнама (Чинь, Тарасов, 2016), озера West, г. Ханой (Nguyen et al., 2016) и вода Красной реки (Trinh et al., 2018; Pham et al., 2018). В исследовании (Лабутина, Тарасов, 2018) показана возможность построения по космическим снимкам карт распространения взвеси в южной части оз. Байкал, позволившие оценить распределение твердого стока по протокам дельты Селенги в зависимости от времени и фазы водного режима.

Программа Европейского Космического Агентства Copernicus (ESA) Sentinel 2 включает два космических аппарата наблюдения Земли (Sentinel 2A и Sentinel 2B), позволяющие получать изображе-

**Таблица 1.** Характеристики многозонального изображения аппаратуры MSI

Канал	Спектральный диапазон, $\mu\text{м}$	Пространственное разрешение, м
1	0.421–0.457	60
2	0.439–0.535	10
3	0.537–0.582	10
4	0.646–0.685	10
5	0.694–0.714	20
6	0.731–0.749	20
7	0.768–0.796	20
8	0.767–0.908	10
8a	0.848–0.881	20
9	0.931–0.958	60
10	1.338–1.414	60
11	1.539–1.681	20
12	2.072–2.312	20

ния в 13 спектральных каналах диапазона 0.443–2190 мкм (Pahlevan et al., 2017). В табл. 1 показаны спектральные и пространственные характеристики многозонального изображения, получаемого аппаратурой MultiSpectral Instrument (MSI), установленной на спутнике Sentinel 2. Система Sentinel 2 обеспечивает 5 – дневный период обновления информации, которая бесплатно предоставляется заинтересованным пользователям.

Космические датчики системы Sentinel 2 применялись в исследованиях Liu et al. (2017), Caballero et al. (2018), Elhag et al. (2019), Ghirardi et al. (2019) для определения концентрации взвешенных веществ в поверхностных водах. В отмеченных выше работах показано, что изображения MSI Sentinel 2 являются весьма ценным ресурсом для исследования и мониторинга окружающей среды, включая оценку качества поверхностных вод.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

### *Исходные данные*

Река Дай (Day river) расположена в юго-западной части дельты Красной реки и является одной из крупных рек в северном Вьетнаме. Ее длина составляет около 240 км, и она несет свои воды через 5 провинций с административными центрами Ханой (Hanoi), Хоабинь (Hoa Binh), Ханам (Ha Nam), Ниньбинь (Ninh Binh) и Намдинь (Nam Dinh). Площадь бассейна реки составляет

5800 км<sup>2</sup>. Ширина реки меняется от 40 м в самой ее узкой части в районе г. Ханой до 875 м в самой широкой части, вблизи устья. Средняя глубина реки составляет 7 м. Начиная с 2000 г., постоянно наблюдается увеличивающееся загрязнение поверхностных вод р. Дай вследствие строительства производственных предприятий и усиливающейся добычи природных ресурсов на окружающей территории. Исследование и применение современных технологий мониторинга для оценки качества поверхностных вод данной территории является важным практическим вопросом, решение которого обеспечит своевременной информацией органы местного управления и позволит реализовать концепцию устойчивого использования поверхностных водных ресурсов.

В качестве исходных данных было выбрано многозональное изображение MSI Sentinel 2A (код S2A\_MSIL1C\_20180409T032541\_N0206\_R018\_T48QXH\_20180409T070457), полученное 9 апреля 2018 года (рис. 1). Данное изображение было обработано с целью проведения геометрической и радиационной коррекции. В работе использованы снимки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра (0.439–0.535; 0.537–0.582; 0.646–0.685; 0.767–0.908 мкм).

Наземные данные были получены в ходе полевых работ научно-исследовательской экспедиции 9 апреля 2018 г. на нескольких участках, расположенных вдоль русла реки. Пробы воды отбирались в средней части реки на глубине 0–25 см с помощью горизонтального пробоотборника Van Dorn Sampler объемом 4 литра. Координаты точек отбора проб определялись с помощью прибора-навигатора GPS. Пробы воды помещались в контейнер с температурой 4°C и сразу же передавались в лабораторию для анализа. Отбор проб был выполнен в 35 точках (рис. 1). Определение концентрации взвеси в воде проводилось методом фильтрации воды (табл. 2) и определения сухого остатка.

### *Методы*

Изображение MSI Sentinel 2 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) предварительно обрабатывалось для устранения радиометрических и геометрических погрешностей. Исходные значения пикселей изображения преобразовывались в значения коэффициентов яркости с помощью программного обеспечения SNAP Desktop. Атмосферная коррекция проводилась с использованием модуля Sen2Cor классическим методом DOS (Dark object subtraction) (Chavez, 1988; Chavez, 1996) на основе вычитания из значений яркости пикселей изображения яркости пикселя самого темного объекта на изображении.



Рис. 1. Местоположение исследуемой территории и точек отбора проб воды.

Метод линейной регрессии (Ritchie et al., 1987; Ritchie et al., 1990) применялся для определения связи между количеством взвешенных частиц, полученным в полевых наблюдениях и коэффициентами яркости, рассчитанными на основе многозональной съемки Sentinel 2. Коэффициенты линейной регрессии вычислялись из спектральной отражательной способности в синем (канал 2), зеленом (канал 3), красном (канал 4) и ближнем инфракрасном каналах (канал 8) изображения MSI Sentinel 2 и значений TSS (Total Suspended Solids) в пробах воды. В работе были получены уравнения регрессии на основе только одного, двух, трех и всех четырех каналов (2, 3, 4, 8) изображения MSI Sentinel 2. Из полученных уравнений с помощью  $R^2$  выбрана оптимальная функция регрессии для определения концентрации взвеси. Блок-схема методики определения концентрации взвешенных веществ в поверхностных

водах по спутниковому снимку Sentinel 2 показана на рис. 2.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим уравнения регрессии, полученные по данным Sentinel 2 на объект исследования – поверхностные воды р. Дай. Для построения уравнений регрессии были использованы данные о концентрации взвеси в пробах с 28 участков реки, оставшиеся 7 участков, использовались для оценки точности полученной модели регрессии. Уравнения линейной регрессии, рассчитанные для разного набора каналов, представлены в табл. 3.

Полученные результаты показали, что коэффициент детерминации ( $R^2$ ) достигает наивысшего значения ( $R^2 = 0.82$ ) в функции линейной регрессии при использовании всех 4 каналов (2, 3, 4, 8) изображения Sentinel 2. Таким образом, наилучшее уравнение для расчета концентрации

**Таблица 2.** Местоположение участков отбора проб воды и концентрация взвешенных частиц (мг/л)

№ точки	Координаты		Концентрации TSS (мг/л)
	широта	долгота	
1	20°34'26.0" с.ш.	105°52'11.0" в.д.	24
2	20°34'19.0" с.ш.	105°53'23.0" в.д.	26
3	20°33'14.0" с.ш.	105°53'41.0" в.д.	22
4	20°32'36.6" с.ш.	105°54'29.1" в.д.	27
5	20°32'33.9" с.ш.	105°54'31.8" в.д.	28
6	20°32'34.3" с.ш.	105°54'35.9" в.д.	28
7	20°32'36.8" с.ш.	105°54'37.5" в.д.	28
8	20°31'46.3" с.ш.	105°54'44.9" в.д.	26
9	20°30'44.0" с.ш.	105°54'24.0" в.д.	25
10	20°29'41.3" с.ш.	105°53'37.1" в.д.	25
11	20°28'37.5" с.ш.	105°53'23.2" в.д.	28
12	20°24'27.0" с.ш.	105°54'26.0" в.д.	28
13	20°22'27.5" с.ш.	105°54'57.3" в.д.	26
14	20°21'17.4" с.ш.	105°57'10.9" в.д.	24
15	20°19'41.7" с.ш.	105°56'08.4" в.д.	24
16	20°19'37.7" с.ш.	105°56'10.0" в.д.	29
17	20°18'38.2" с.ш.	105°58'05.7" в.д.	30
18	20°15'47.0" с.ш.	105°58'52.0" в.д.	31
19	20°15'43.8" с.ш.	105°58'59.0" в.д.	29
20	20°15'06.4" с.ш.	106°01'59.1" в.д.	30
21	20°15'07.2" с.ш.	106°02'48.6" в.д.	30
22	20°13'27.4" с.ш.	106°02'12.0" в.д.	33
23	20°15'18.0" с.ш.	106°05'27.0" в.д.	35
24	20°15'02.0" с.ш.	106°05'55.0" в.д.	36
25	20°15'02.6" с.ш.	106°05'51.4" в.д.	36
26	20°12'60.0" с.ш.	106°06'31.0" в.д.	33
27	20°12'08.7" с.ш.	106°09'34.8" в.д.	32
28	20°07'23.0" с.ш.	106°09'44.0" в.д.	33
29	20°07'21.0" с.ш.	106°09'38.0" в.д.	35
30	20°05'45.0" с.ш.	106°08'43.0" в.д.	35
31	20°03'22.0" с.ш.	106°07'53.0" в.д.	40
32	20°02'59.5" с.ш.	106°07'00.5" в.д.	36
33	20°03'01.3" с.ш.	106°06'58.7" в.д.	36
34	20°00'21.1" с.ш.	106°06'27.4" в.д.	37
35	19°58'56.8" с.ш.	106°05'54.4" в.д.	36

взвешенных веществ в поверхностных водах р. Дай следующее:

$$TSS(\text{мг/л}) = 741.5B_2 - 180.3B_3 + 96.2B_4 - 384.3B_8 - 21.1, \quad (1)$$

где  $B_2, B_3, B_4, B_8$  – значения спектральной яркости в каналах 2, 3, 4 и 8 изображений Sentinel 2.

Сравнение рассчитанных (согласно формуле (1)) концентраций взвеси и определенных по данным наземных 7 контрольных участков представлены в табл. 4. Можно видеть, что для всех контрольных участков, погрешность в определении концентрации взвеси по спутниковому снимку Sentinel 2 и результатам наземных наблюдений не слишком велика. Данная погрешность варьирует

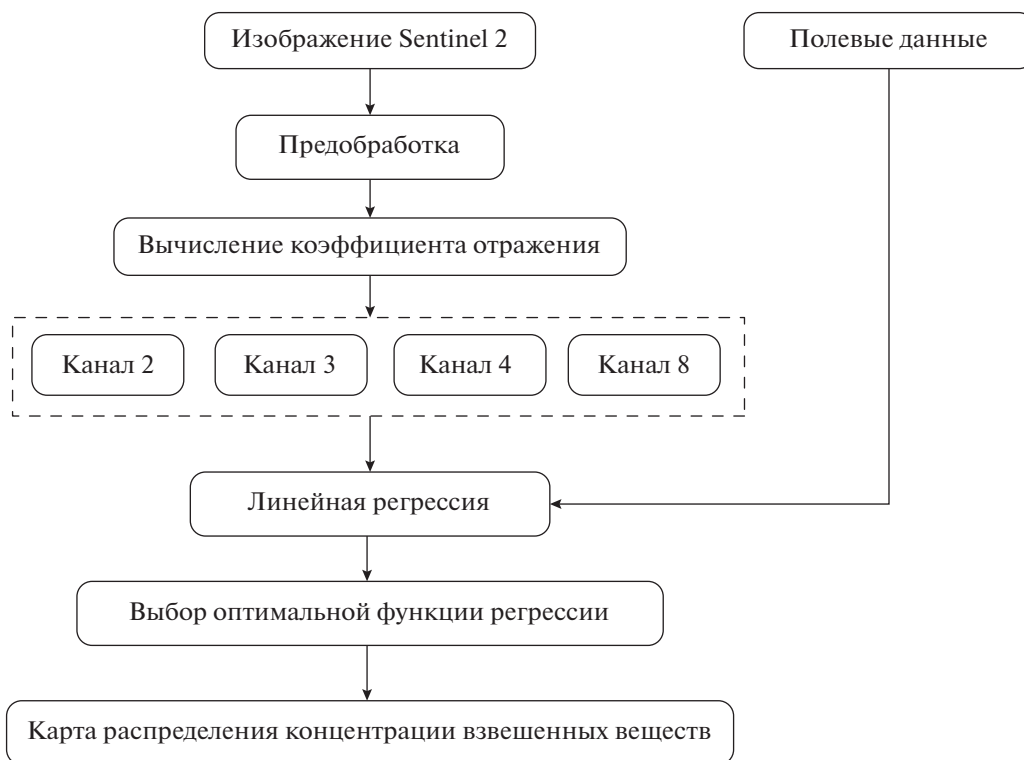
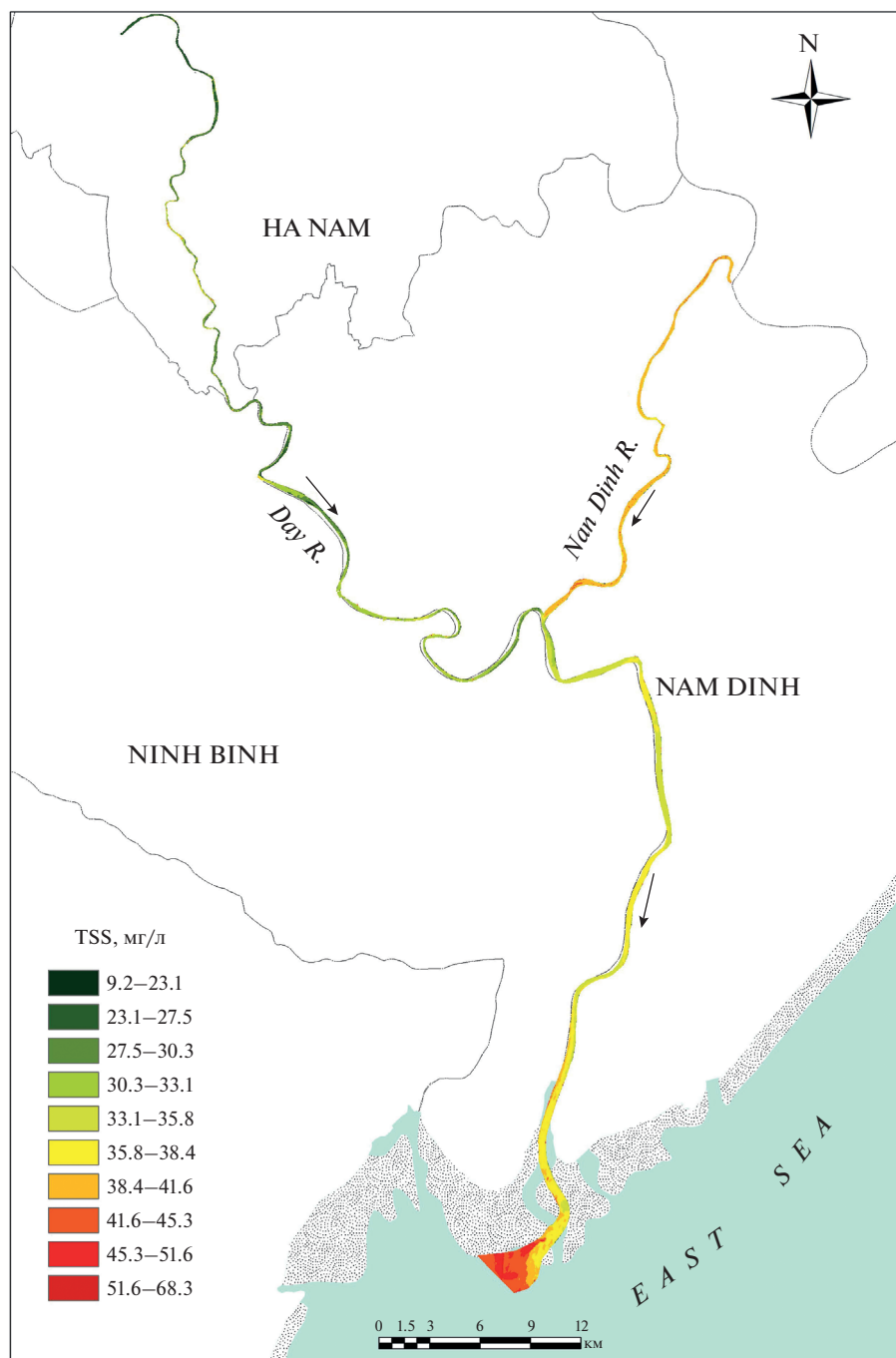


Рис. 2. Блок-схема методики определения концентрации взвешенных веществ в поверхностных водах по данным многозональной съемки Sentinel 2.

Таблица 3. Уравнения линейной связи между концентрацией взвеси и значением спектральной яркости поверхности воды

№	Спектральные каналы	Уравнения регрессии	$R^2$
1	$B_2$	$351.4B_2 - 14.0$	0.31
2	$B_3$	$254.4B_3 + 0.1$	0.42
3	$B_4$	$149.4B_4 + 14.3$	0.39
4	$B_8$	$-59.3B_8 + 34.2$	0.02
5	$B_2, B_3$	$-714.0B_2 + 685.7B_3 + 39.0$	0.50
6	$B_2, B_4$	$-57.2B_2 + 171.4B_4 + 19.2$	0.35
7	$B_2, B_8$	$665.6B_2 - 355.6B_8 - 31.3$	0.69
8	$B_3, B_4$	$468.8B_3 - 142.6B_4 - 10.0$	0.44
9	$B_3, B_8$	$-250.1B_3 + 357.5B_8 + 3.6$	0.66
10	$B_4, B_8$	$240.6B_4 - 293.2B_8 + 22.9$	0.65
11	$B_2, B_3, B_4$	$-666.2B_2 + 747.3B_3 + 60.2B_4 + 32.1$	0.50
12	$B_2, B_3, B_8$	$730.6B_2 - 36.4B_3 - 365.0B_8 - 34.4$	0.69
13	$B_2, B_4, B_8$	$530.6B_2 + 53.7B_4 - 347.7B_8 - 20.6$	0.70
14	$B_3, B_4, B_8$	$235.2B_3 + 86.5B_4 - 269.0B_8 + 10.0$	0.67
15	$B_2, B_3, B_4, B_8$	$741.5B_2 - 180.3B_3 + 96.2B_4 - 384.3B_8 - 21.1$	0.82



**Рис. 3.** Карта распределения концентрации взвешенных веществ в поверхностных водах р. Дай, полученная по данным Sentinel 2.

от 3.7 до 8.5%. Полученные результаты указывают на возможность определения взвешенного вещества в речной воде с достаточно высокой точностью на основе многозонального изображения MSI Sentinel 2.

Распределение количества взвеси в поверхностных водах р. Дай, рассчитанное по данным Sentinel 2, показано на рис. 3. Можно видеть, что

концентрация взвеси в воде изменяется от 9.2 до 68.3 мг/л, причем взвешенных веществ немного в верховьях р. Дай. Концентрация взвеси в поверхностных водах р. Дай достигает высоких уровней на участке впадения в нее притока Намдинь, и имеет тенденцию к некоторому уменьшению вниз по течению, а затем количество взвеси резко увеличивается в низовьях реки и при впадении ее в море.

**Таблица 4.** Содержание взвеси, определенной по данным Sentinel 2 и данным наземных наблюдений

№	Координаты		Концентрации TSS, мг/л		Погрешность, мг/л
	широта	долгота	определение по данным ДЗ	полевые результаты	
3	20°33'14.0" с.ш.	105°53'41.0" в.д.	23.9	22	1.9
8	20°31'46.3" с.ш.	105°54'44.9" в.д.	25.0	26	-1.0
15	20°19'41.7" с.ш.	105°56'08.4" в.д.	26.0	24	2.0
20	20°15'06.4" с.ш.	106°01'59.1" в.д.	30.9	30	0.9
28	20°07'23.0" с.ш.	106°09'44.0" в.д.	31.4	33	-1.6
31	20°03'22.0" с.ш.	106°07'53.0" в.д.	42.1	40	2.1
35	19°58'56.8" с.ш.	106°05'54.4" в.д.	39.1	36	3.1

Качество воды р. Дай по национальному техническому стандарту качества (Vietnam Ministry of Natural Resources and Environment, 2015) в значительной степени соответствует показателям от  $A_2$  (для целей водоснабжения, но с использованием соответствующих технологий обработки) до  $B_1$  (для полива, орошения или других целей с аналогичными требованиями к обработке воды).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутниковые изображения MSI Sentinel 2 обладают весьма ценными характеристиками, среди которых необходимо отметить широкий спектральный диапазон, небольшое время для повторного получения изображений на одну и ту же территорию, высокое пространственное разрешение и бесплатное предоставление пользователям. Это позволяет использовать данные Sentinel 2 для мониторинга речных бассейнов и оценивать содержание взвешенных веществ в поверхностных водах с целью эффективного управления водными ресурсами. Точность определения содержания взвеси в поверхностных водах р. Дай по данным спутниковых снимков Sentinel 2 достаточно высокая. Коэффициент детерминации в уравнениях регрессии  $R^2$  достигает значения 0.82, погрешности оценки взвеси в воде по космическим данным не превышали 3.1 мг/л.

Анализ полученных результатов показал, что вода р. Дай в провинциях Ханам, Намдинь и Ниньнинь имеет не высокое содержание взвеси (согласно классификации QCVN08-МТ:2015/ВТНМТ от  $A_2$  до  $B_1$ ). Содержание взвешенных веществ в речной воде увеличивается вниз по течению реки и достигает максимума в устье реки. Высокие концентрации взвеси встречаются в местах впадения в р. Дай других более мелких рек, например р. Бой и р. Намдинь.

Методика, разработанная в данном исследовании, может быть полезной руководителям на разных уровнях управления, экологами и другим специ-

алистам для своевременного выполнения профилактических мероприятий с целью уменьшения загрязнения поверхностных вод речных бассейнов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарят доктора Чинь Тхи Тхам (Trinh Thi Tham), Ханойский институт природных ресурсов и окружающей среды (Вьетнам) за предоставление данных для завершения этого исследования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лабутина И.А., Сафьянов Г.А., Шарлай Т.Г.* Исследования распространения взвесей в море по многозональным снимкам // ДАН. 1976. Т. 230. № 2. С. 536–538.
- Лабутина И.А., Сафьянов Г.А.* Исследования распространения твердого стока рек по аэрокосмическим снимкам на примере Кодора и Селенги // Космическая съемка и тематическое картографирование. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. С. 118–125.
- Лабутина И.А., Тарасов М.К.* Изучение распространения твердого стока реки Селенги по космическим снимкам // География и природные ресурсы. 2018. № 1. С. 66–72.
- Чинь Л., Тарасов М.К.* Методика определения концентрации взвеси в поверхностных водах водохранилища Чи Ан (Вьетнам) по данным дистанционного зондирования // Вестник Московского университета. 2016. Серия 5. География. Т. 2. С. 38–43.
- Caballero I., Steinmetz F., Navarro G.* Evaluation of the first year of operational Sentinel-2A data for retrieval of suspended solids in medium- to high-turbidity waters // Remote Sensing. 2018. V. 10. 982. P. 3–23.
- Chavez P.S.* An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data // Rem. Sens. Env. 1988. V. 24. P. 459–479.
- Chavez P.S.* Image-based atmospheric corrections – revisited and improved // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1996. V. 62(9). P. 1025–1036.
- Chen Z., Hanson J.D., Curran P.J.* The form of the relationship between suspended sediment concentration and spec-



- tral reflectance: its implications for the use of Daedalus 1268 data // *Int. J. Rem. Sens.* 1991. V. 12(1). P. 215–222.
- Chen Z., Curran P.J., Hansom J.D. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration // *Rem. Sens. Env.* 1992. V. 40(1). P. 67–77.
- Dekker A., Zamurovic-Nenad Z., Hoogenboom H., Peter S. Remote sensing, ecological water quality modelling and in situ measurements: A case study in shallow lakes // *Hydrological Science J.* 1996. V. 41. P. 531–547.
- Doxaran D., Jean – Marie Froidefond, Samantha Lavender, Patrice Castaing. Spectral signature of highly turbid waters application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations // *Rem. Sens. Env.*, 2007. V. 81. P. 149–161.
- Elhag M., Gita I., Othman A., Bahrawi J., Gikas P. Assessment of water quality parameters using temporal remote sensing spectral reflectance in arid environments Saudi Arabia // *Water.* 2019. V. 11. 556. P. 2–14.
- Ghirardi N., Bolpagni R., Bresciani M., Valerio G., Pilotti M., Giardino C. Spatiotemporal dynamics of submerged aquatic vegetation in a deep lake from Sentinel-2 data // *Water.* 2019. V. 11. P. 563.
- Gholizadeh M.H., Melesse A.M., Reddi L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques // *Sensors.* 2016. V. 16. P. 2–43.
- Guzman V.R., Santaella F.G. Using MODIS 250 m Imagery to Estimate Total suspended sediment in a Tropical open bay, *Int. J. of Systems Applications, Engineering & Development.* 2009. Issue 1. V. 3. P. 36–44.
- He W. Water quality monitoring in slightly – polluted body through remote sensing – a case study in Guanting Reservoir Beijing, China // *Front. Environ. Sci. Engin.* 2008. V. 1. P. 11.
- Liu H., Li Q., Shi T., Hu S., Wu G., Zhou Q. Application of Sentinel 2 MSI images to retrieve suspended particulate matter concentrations in Poyang Lake // *Remote Sensing.* 2017. 9. P. 761.
- Mobley C. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // *Applied Optical* 1999. V. 38. P. 7442–7455.
- Moran M.S. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output // *Rem. Sens. Env.* 1992. V. 41. P. 169–184.
- Nguyen T.T.H., Bui D.C., Nguyen T.P.T., Bui T.N. First experience in modeling spatial distribution of Chlorophyll-a concentration and TSI in the West Lake water using Sentinel-2A Image // *Vietnam National University J. Science.* 2016. V. 32 (2S). P. 123–132.
- Ritchie J.C., Schiebe F.R., McHenry J.R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters // *J. Am. Soc. of Ph.* 1976. V. 42. P. 1539–1545.
- Ritchie J.C., Cooper C.M., Yongqing J. Using Landsat multispectral scanner data to estimate suspended sediments in Moon Lake, Mississippi // *Rem. Sens. Env.* 1987. V. 23. P. 65–81.
- Ritchie J.C., Cooper C.M., Schiebe F.R. The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi // *Rem. Sens. Env.* 1990. V. 33. P. 137–148.
- Pham Q.V., Nguyen T.T.H., Pahlevan N., Le T.O., Nguyen T.B., Nguyen N.T. Using Landsat-8 Images for Quantifying Suspended Sediment Concentration in Red River (Northern Vietnam). *Remote Sensing.* 2018. V. 10(11). P. 2–12.
- Pahlevan N., Sarkar S., Franz B.A., Balasubramanian S.V., He J. Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations // *Remote Sensing of Environment.* 2017. V. 201. P. 47–56.
- Trinh Le Hung, Zablotskii V., Le Thi Giang, Dinh Thi Thu Hien, Le Thi Trinh, Trinh Thi Tham, Nguyen Thi Thu Nga. Estimation of suspended sediment concentration using VNREDSat – 1A multispectral data, a case study in Red River, Hanoi, Vietnam // *Geography, Environment, Sustainability.* 2018. V. 11(3). P. 49–60.
- Vietnam Ministry of Natural Resources and Environment, National technical regulation on surface water quality QCVN08-MT:2015/BTNMT. 2015.

## A Method for Determining the Concentration of Suspended Sediment in Downstream Day River (Northern Vietnam) Using MSI Sentinel 2 High Spatial Resolution Data

Le Hung Trinh<sup>1</sup>, V. R. Zablotskii<sup>2</sup>, and Thi Thu Nga Nguyen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Suspended sediment concentration is an important parameter in the assessment of surface water quality. Many studies have demonstrated that, reflectance values from remote sensing data have a strong relationship with suspended sediment concentration. This article presents the results of determination of suspended sediment concentration in surface water of Day River in northern Vietnam using Sentinel 2 multispectral images with a spatial resolution of 10 meters. To this end, the reflectance values of the water surface, which calculated on the basis of the visible and near-infrared channel of the Sentinel 2 image, were compared with in situ data. As a result, regression models were developed based on the relationship between the reflectance values and the concentration of suspended sediment. Among all the models, the most optimal linear equation was chosen to conduct quantitative assessments of surface water pollution in this river basin. The results obtained in the study can be used for monitoring, evaluation and management of surface water quality.

**Keywords:** remote sensing, Sentinel 2, water pollution, suspended sediment, Day River



## REFERENCES

- Labutina I.A., Saf'yanov G.A., Sharlai T.G.* Issledovanie rasprostraneniya vzvesei v more po mnogozonalmym snimkam [Study of the distribution of suspended matter at sea based on multi-zone images] // DAN 1976. V. 230. № 2. P. 536–538 (In Russian).
- Labutina I.A., Saf'yanov G.A.* Issledovaniya rasprostraneniya tverdogo stoka rek po aerokosmicheskim snimkam na primere Kodora i Selengi [Exploration of the distribution of solid river runoff from aerospace images: Kodor and Selenga as an example of study] // Kosmicheskaya s'emka i tematicheskoe kartografirovaniye. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1980. P. 118–125 (In Russian).
- Labutina I.A., Tarasov M.K.* Izuchenie rasprostraneniya tverdogo stoka reki Selengi po kosmicheskim snimkam [Studying the distribution of solid runoff of the Selenga River from satellite images] // Geografiya i prirodnye resursy. 2018. № 1. P. 66–72 (In Russian).
- Le Hung Trinh, Tarasov M.K.* Metodika opredeleniya kontsentratsii vzvesi v poverkhnostnykh vodakh vodokhranilishcha Chi An (V'etnam) po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Method for determining the concentration of suspended matter in the surface waters of the Chi An reservoir (Vietnam) according to remote sensing data] // Vestnik Moskovskogo universiteta. 2016. Seriya 5. Geografiya. V. 2. P. 38–43 (In Russian).
- Caballero I., Steinmetz F., Navarro G.* Evaluation of the first year of operational Sentinel-2A data for retrieval of suspended solids in medium- to high-turbidity waters // Remote Sensing. 2018. V. 10. 982. P. 3–23.
- Chavez P.S.* An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data // Rem. Sens. Env. 1988. V. 24. P. 459–479.
- Chavez P.S.* Image-based atmospheric corrections – revisited and improved // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1996. V. 62(9). P. 1025–1036.
- Chen Z., Hanson J.D., Curran P.J.* The form of the relationship between suspended sediment concentration and spectral reflectance: its implications for the use of Daedalus 1268 data // Int. J. Rem. Sens. 1991. V. 12(1). P. 215–222.
- Chen Z., Curran P.J., Hansom J.D.* Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration // Rem. Sens. Env. 1992. V. 40(1). P. 67–77.
- Dekker A., Zamurovic-Nenad Z., Hoogenboom H., Peter S.* Remote sensing, ecological water quality modelling and in situ measurements: A case study in shallow lakes // Hydrological Science J. 1996. V. 41. P. 531–547.
- Doxaran D., Jean-Marie Froidefond, Samantha Lavender, Patrice Castaing,* Spectral signature of highly turbid waters application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations // Rem. Sens. Env., 2007. V. 81. P. 149–161.
- Elhag M., Gita I., Othman A., Bahrawi J., Gikas P.* Assessment of water quality parameters using temporal remote sensing spectral reflectance in arid environments Saudi Arabia // Water. 2019. V. 11. 556. P. 2–14.
- Ghirardi N., Bolpagni R., Bresciani M., Valerio G., Pilotti M., Giardino C.* Spatiotemporal dynamics of submerged aquatic vegetation in a deep lake from Sentinel-2 data // Water. 2019. V. 11. P. 563.
- Gholizadeh M.H., Melesse A.M., Reddi L.* A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques // Sensors. 2016. V. 16. P. 2–43.
- Guzman V.R., Santaella F.G.* Using MODIS 250 m Imagery to Estimate Total suspended sediment in a Tropical open bay, Int. J. Systems Applications, Engineering & Development. 2009. Issue 1. V. 3. P. 36–44.
- He W.* Water quality monitoring in slightly – polluted body through remote sensing – a case study in Guanting Reservoir Beijing, China // Front. Environ. Sci. Engin, 2008. V. 1. P. 11.
- Liu H., Li Q., Shi T., Hu S., Wu G., Zhou Q.* Application of Sentinel 2 MSI images to retrieve suspended particulate matter concentrations in Poyang Lake // Remote Sensing, 2017. 9. P. 761.
- Mobley C.* Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // Applied Optical 1999. V. 38. P. 7442–7455.
- Moran M.S.* Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output // Rem. Sens. Env. 1992. V. 41. P. 169–184.
- Nguyen T.T.H., Bui D.C., Nguyen T.P.T., Bui T.N.* First experience in modeling spatial distribution of Chlorophyll-a concentration and TSI in the West Lake water using Sentinel-2A Image // Vietnam National University J. Science. 2016. V. 32 (2S). P. 123–132.
- Ritchie J.C., Schiebe F.R., McHenry J.R.* Remote sensing of suspended sediments in surface waters // J. Am. Soc. of Ph. 1976. V. 42. P. 1539–1545.
- Ritchie J.C., Cooper C.M., Yongqing J.* Using Landsat multispectral scanner data to estimate suspended sediments in Moon Lake, Mississippi // Rem. Sens. Env. 1987. V. 23. P. 65–81.
- Ritchie J.C., Cooper C.M., Schiebe F.R.* The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi // Rem. Sens. Env. 1990. V. 33. P. 137–148.
- Pham Q.V., Nguyen T.T.H., Pahlevan N., Le T.O., Nguyen T.B., Nguyen N.T.* Using Landsat-8 Images for Quantifying Suspended Sediment Concentration in Red River (Northern Vietnam). Remote Sensing. 2018. V. 10(11). P. 2–12.
- Pahlevan N., Sarkar S., Franz B.A., Balasubramanian S.V., He J.* Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 201. P. 47–56.
- Trinh Le Hung, Zablotskii V., Le Thi Giang, Dinh Thi Thu Hien, Le Thi Trinh, Trinh Thi Tham, Nguyen Thi Thu Nga.* Estimation of suspended sediment concentration using VNREDSat – 1A multispectral data, a case study in Red River, Hanoi, Vietnam // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11(3). P. 49–60.
- Vietnam Ministry of Natural Resources and Environment, National technical regulation on surface water quality QCVN08-MT:2015/BTNMT. 2015.