

ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЕМОВ ЯКУТИИ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ КОСМОСНИМКОВ

С. А. Тихонова¹, Г. П. Стручкова¹, Т. А. Капитонова¹

¹ ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера
им. В. П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

Аннотация: Проведена оценка загрязнения водных объектов на территории Республики Саха (Якутия) после прорыва четырех дамб дражных котлованов на месторождении «Иреляхская россыпь» в августе 2018 г.. Прорыв послужил причиной масштабного загрязнения рек Ирелях, Малая Ботуобия и Вилюй, протекающих по территории Республики Саха (Якутия), которые снабжают питьевой водой жителей четырех районов. Вследствие аварии был нанесен огромный ущерб водным экосистемам (ПДК взвешенных частиц были превышены более чем в 700 раз), который составляет, по оценке министерства экологии Республики, около 5 млрд руб. Экология северного региона восстанавливается значительно медленнее по сравнению с регионами, занимающими область умеренного климата. Степень загрязнения воды в реке оценивалась методом спектрального анализа космоснимков на программном комплексе ENVI. На основе синтеза каналов SWIR-NIR-RED обработанных снимков со спутников Landsat TM7 и 8 OLI сделана оценка степени загрязнения водного потока по индексу AMWI (Acid Mine Water Index) в двух вариантах: по оценке превышения взвешенных частиц и изменению содержания железа в воде. Предложенная методика может применяться для оперативной оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций и отслеживания процесса загрязнения на труднодоступных территориях Севера и Арктики, своевременного оповещения населения об ухудшении экологической ситуации и принятия превентивных мероприятий. Несмотря на широкий общественный резонанс, ущерб от прошедшей экологической катастрофы до сих пор не возмещен.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, спектральные характеристики, космоснимки, загрязнение водных ресурсов, программный комплекс ENVI, прорыв дамбы, индекс AMWI, синтез каналов SWIR-NIR-RED, мутность воды.

Для цитирования: Тихонова С. А., Стручкова Г. П., Капитонова Т. А. Оценка антропогенного загрязнения водоемов Якутии по спектральным характеристикам космоснимков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12-1. – С. 213–222. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_213.

Manmade pollution assessment in water bodies in Yakutia using color response curves and satellite images

S. A. Tikhonova¹, G. P. Struchkova¹, T. A. Kapitonova¹

¹ FRC "The Yakut Scientific Centre of SB RAS", Larionov Institute of the Physical-Technical Problem of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Abstract: Pollution of water bodies in the Republic of Sakha (Yakutia) is assessed after failure of 4 dredging dams at Irelyakh placer in August 2018, which has caused large-scale pollution of the Irelyakh, Malaya Botuobia and Vilyui Rivers which supply drink water to 4 residential areas in Yakutia. The accident adversely damaged the water ecosystems (MAC of suspended matter was exceeded by more than 700 times). By estimates of the Ministry of Ecology of the Republic, the economic damage amounted to 5 billion rubles. It is known that northern ecology recovers much slower than in the moderate climate areas. The river water pollution was assessed by the method of spectral analysis of satellite images in ENVI environment. After synthesizing SWIR–NIR–RED channels of interpreted satellite images Landsat TM7 and 8 OLI, the water flow pollution assessment is implemented using AMWI (Acid Mine Water Index) in two variants: concentration of suspended matter and variation in iron content of water. The proposed procedure is applicable for prompt assessment of damage caused by emergencies, pollution tracing in hard-to-reach areas in the North and in the Arctic, advanced warning of population on worsening of ecological satiation and for early prevention and precaution. It is should be mentioned that the loss due to the mentioned environmental disaster remains unretrieved despite the broad public response.

Key words: remote earth sensing data, color response curves, satellite images, water pollution, ENVI, dam failure, AMWI, synthesis of SWIR–NIR–RED channels, water turbidity.

For citation: Tikhonova S. A., Struchkova G. P., Kapitonova T. A. Manmade pollution assessment in water bodies in Yakutia using color response curves and satellite images. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12-1):213–222. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_213.

Введение

Проблема загрязнения водных ресурсов в настоящее время носит глобальный характер, а для развития региона наличие чистой воды и состояние водных объектов занимает перво-степенное место. Проведение мониторинга с использованием метода отбора проб и лабораторного анализа не всегда возможно из-за труднодоступности мест загрязнения, больших материальных затрат и определения масштабов загрязнений [1–4], а динамику изменений удобнее отслеживать с применением методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Современные технологии ДЗЗ дают возможность проводить анализ и оценку геоэкологического состояния водных объектов и окружающей среды в целом и фиксировать состояние обширных территорий практически одномоментно. Это позволяет оперативно отслеживать и анализировать процессы изменения окружающей

среды, обеспечивать регулярное наблюдение, что особенно важно в условиях дефицита данных наземных обследований [5]. Исследования по оценке состояния территории и загрязнения водных ресурсов методами дистанционного зондирования выполнены многими российскими и зарубежными авторами. Так, в работах [6–8] рассматривается методика оценки загрязнений предприятиями угольной промышленности и нефтегазового комплекса, в [9–12] представлены системы космического и наземного мониторинга для предотвращения экологических рисков на водных объектах, а также интегрированные системы, широко используемые в последнее время для измерения параметров качества воды.

Методы и материалы

При дешифрировании выполняется измерение отраженного или собственного электромагнитного излучения с помощью различных датчиков

и съемочных систем. Методы получения ДДЗЗ разделяются на пассивные и активные. При пассивной съемке информацию получают путем регистрации либо отраженного от объекта солнечного светового потока, либо излучаемого самим объектом. При активной съемке исследуемый объект облучается лазером с борта космического спутника, и приемные устройства спутника регистрируют отраженное объектом излучение. Тон полученного изображения является функцией яркости объекта в пределах спектральной чувствительности приемника излучений. Изображение формируется благодаря различной яркости элементов исследуемых объектов, вследствие чего между ними проявляются яркостные контрасты. Различия в спектральных характеристиках объектов являются основой применения многозональной съемки для распознавания различных объектов.

Спектральные характеристики пространственных объектов дают более тонкий анализ их состояния и свойств. В совокупности данные характеристики позволяют идентифицировать пространственные объекты загрязнений на снимках и следить за динамикой изменения, прогнозировать распространение загрязняющих веществ, ранжировать участки реки по степени загрязненности [13]. Целью данной работы является дешифрирование космоснимков методом спектрального анализа для оценки загрязнения водных объектов. Объектом применимости данных методов цифровой обработки космических изображений был выбран район рек Ирелях, Малая Ботуобия и Вилюй, воды которых подверглись масштабному загрязнению отходами алмазодобывающих предприятий вследствие разрушения дамб дражных полигонов.

По результатам лабораторных исследований после прорыва дамбы нормативы предельно допустимых концентраций были существенно превышены: взвешенных веществ в 728,6 раза, железа в 38,7 раза, меди в 27,6 раза [14].

Подсчитано, что ущерб составляет по реке Ирелях — 11 млн 190 тыс. рублей, по реке Малая Ботуобия — 4 млрд 67 млн рублей. Ущерб реке Вилюй был рассчитан управлением Росприроднадзора по Республике Саха (Якутия) и составил около 22 млрд 700 млн рублей.

При дешифрировании загрязнения водных объектов использовались спектральные признаки, позволяющие в определенных диапазонах электромагнитных волн проводить анализ вариации оптических плотностей, вызываемых растворами и взвесьями органических и неорганических веществ, это дает возможность установить степень загрязнения водных ресурсов [15].

В данной работе использовались методы предварительной цифровой обработки космических изображений: геометрическая, радиометрическая и атмосферная коррекция. После проведения обработки ДЗЗ их можно использовать для создания качественной картографической продукции.

Для достижения данной цели были выполнены следующие задачи: 1) выделение на реках Ирелях, Малая Ботуобия и Вилюй тестовых участков; 2) составление базы данных архивных разновременных космоснимков; 3) дешифрирование космических изображений на территории тестовых участков с помощью визуальных и цифровых методов обработки и сравнение результатов с данными фоновых участков. При решении поставленной задачи использовались снимки со спут-

ников Landsat TM7 и 8 OLI, с 6 августа по 5 сентября 2018 года и с 19 августа по 1 сентября 2017 года; составлена база данных, которая применялась в качестве фоновой.

Результаты

Для исследования загрязнения воды был применен метод спектрального анализа на программном комплексе ENVI, проведена радиометрическая и атмосферная коррекция, затем сделана классификация с обучением методом спектрального угла [8]. Для каждого района было исследовано по 3–4 снимка и рассчитано среднее значение для каждого спектра. Составленная база данных космоснимков охватывала территорию Сунтарского, Верхневилуйского, Вилуйского, Нюрбинского, Кобяйского районов.

На рис. 1 представлено расположение на карте исследуемых участков реки Вилуй, пересекающей последовательно территории указанных районов. Расстояние между тестовыми участками: 1 и 2 ~170 км, 2 и 3 ~ 120 км, 3 и 4 ~ 100 км, 4 и 5 ~160 км.

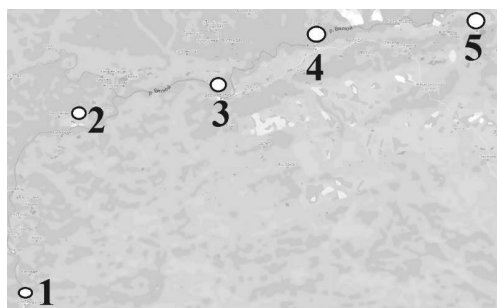


Рис. 1. Расположение исследуемых участков реки Вилуй, пересекающей территории районов: 1 – Сунтарский, 2 – Нюрбинский, 3 – Верхневилуйский, 4 – Вилуйский, 5 – Кобяйский [16]

Fig. 1. The location of the studied sections of the Vilyu River crossing the territories of the districts: 1 – Suntarsky, 2 – Nyurbinsky, 3 – Verkhnevilyuysky, 4 – Vilyuysky, 5 – Kobyaysky [16]

Проводились два варианта оценки загрязнения: сравнением спектральной кривой воды, соответствующей состоянию объекта до и после прорыва дамбы и с использованием индекса AMWI (Acid Mine Water Index) в ближнем ИК-канале. В первом варианте можно оценить превышение количества взвешенных частиц в воде, во втором – превышение содержания железа в реке. На рис. 2 представлены результаты первого варианта исследования – спектральные кривые воды на исследуемых участках после прорыва дамбы в различные моменты времени, соответствующие движению потока загрязнения от Сунтарского до Кобяйского района.

Кривая 1 соответствует участку Сунтарского улуса – самому близкому к источнику загрязнения, в день аварии значения спектральной кривой максимально. Кривая 2 соответствует следующему по течению участку в Нюрбинском улусе, расстояние между участками 1 и 2 – 170 км, причем по времени на следующий день после аварии волна максимальной концентрации загрязнения еще не дошла до участка 2, средняя скорость реки примерно 4,32 км/час. Кривая 3 соответствует участку Верхневилуйска. Учитывая извилистость русла, максимальная концентрация загрязнения достигла участка 3, значения кривой 3 выше, чем кривой 2. Кривая 4 соответствует участку Вилуйска на 5 день после аварии, когда она достигла максимума загрязнения. Кривая 5 соответствует участку Кобяй на 7 день после аварии, когда максимум концентрации загрязнения достиг данного участка, но к этому времени концентрация уже уменьшилась. Для сравнения приводится кривая 6, соответствующая фоновому уровню до аварии.

Для сравнения на графике приводится спектральная кривая воды, соот-

ветствующая состоянию объекта до и после прорыва дамбы. Превышение количества взвешенных частиц в воде увеличивает отражение в ближней ИК-зоне спектра, а органические вещества (типа нефтепродуктов, фенолы и т.п.) — в средней ИК-зоне [8]. Анализ спектральных характеристик воды на исследуемых участках, представленных на рис. 2, где по оси ординат указано значение коэффициента спектральной яркости (КСЯ) — это отношение монохроматических яркостей объекта и идеальной отражающей поверхности, измеряемые при одинаковых условиях. Согласно исследованиям, степень загрязнения постепенно уменьшается от места аварии до последнего по ходу

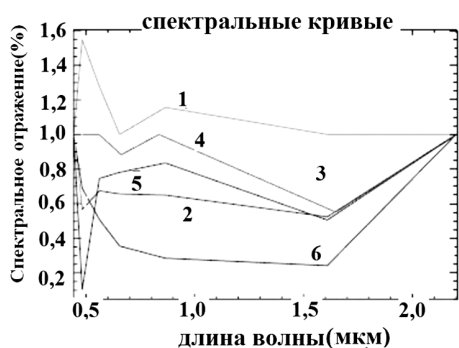


Рис. 2. Спектральные кривые исследуемых участков реки после прорыва дамбы в различные моменты времени: 1 — Сунтарский 28-08-2018; 2 — Нюрбинский 29-08-2018; 3 — Верхневилуйский 01-09-2018; 4 — Вилуйский 03-09-2018; 5 — Кобяйский 05-09-2018; 6 — фоновый 06-08-2017. По оси ординат представлено значение коэффициента спектральной яркости (КСЯ) [15]

Fig. 2. Spectral curves of the studied sections of the river after the dam break at various points in time: 1 — Suntarsky 28-08-2018; 2 — Nyurbinsky 29-08-2018; 3 — Verkhnevilyusky 01-09-2018; 4 — Vilyuisky 03-09-2018; 5 — Kobayai 05-09-2018; 6 — background 06-08-2017. The value of the spectral brightness coefficient (XY) is represented along the ordinate axis [15]

течения реки участка, но остается намного выше фонового. Количество взвешенных частиц в воде превышает фоновое в 2–3 раза.

На рис. 3 сравниваются графики спектральных кривых, показывающих изменение состояния воды в реке до прорыва дамбы, через 9 дней после аварии и через месяц на примере участка реки, расположенного в Сунтарском районе. Получено, что количество взвешенных частиц после прорыва дамбы увеличилось (по сравнению с августом 2017 года) в 2,4 раза, и даже спустя месяц уровень взвешенных частиц остается выше фонового в 1,5 раза. Показано отличие качества воды в реке от эталона, в качестве эталона приведен спектр озера Байкал (кривая 4).

Для второго варианта оценки степени загрязнения поверхностных вод производился расчет индекса AMWI по формуле (1):

$$AMWI = \frac{RED - BLUE}{RED + BLUE}, \quad (1)$$

где RED — КСЯ (коэффициент спектральной яркости) в красном канале (длина волны — от 0,63 от 0,69 мкм), BLUE — КСЯ в синем канале (длина волны — от 0,45 от 0,52 мкм).

Критериями отражательной способности служат коэффициенты интегральной яркости и спектральной яркости.

Спектральные характеристики водных объектов зависят от содержащихся в воде взвесей минерального и органического происхождения, погруженной растительности, глубины, состава донных отложений.

Похожий индекс для оценки степени загрязнения водоема ранее был рекомендован в работе [17]. Он назывался WII (watercolour indicator index) и отличался от предложенного выше индекса



Рис. 3. Спектральные характеристики загрязнения воды на участке в Сунтарском районе: 1 – спектр до прорыва дамбы на 19-08-2017, 2 – спектр после прорыва дамбы на 28-08-2018, 3 – спектр после прорыва дамбы через месяц на 19-09-2018; в качестве эталона под номером 4 выделена спектральная кривая оз. Байкал [15]

Fig. 3. Spectral characteristics of water pollution at the site in the Suntarsky district: 1 – spectrum before the dam break on 19-08-2017, 2 – spectrum after the dam break on 28-08-2018, 3 – spectrum after the dam break a month later on 19-09-2018; as a reference number 4, the spectral curve of the lake is highlighted. Baikal [15]

Таблица

Сравнение значений индекса загрязнения водоема AMWI до и после аварии
Comparison of the values of the AMWI reservoir pollution index before and after the accident

Название участка	Объем выборки	До аварии		После аварии	
		AMWI	Дата снимка	AMWI	Дата снимка
Сунтарский	4	-0,15	06-08-2018	0,41	28-08-2018
Нюрбинский	4	-0,08	30-08-2017	0,3	29-08-2018
Верхневилуйский	4	-0,07	30-08-2017	0,26	01-09-2018
Вилуйский	4	-0,12	01-09-2017	0,22	03-09-2018
Кобяйский	4	-0,06	28-08-2017	0,21	05-09-2018

AMWI тем, что вместо синего канала использовался ближний ИК-канал. Этот индекс позволяет определять содержание железа в воде. Чем выше индекс AMWI, тем выше содержание железа в исследуемом водоеме. Результаты расчета индекса AMWI представлены в табл.

Для каждого участка было исследовано по 4 снимка. В таблице указаны показатели индекса AMWI по участ-

кам до и после аварии с указанием даты, когда был зафиксирован расчет данного показателя. Сравнения значений индекса загрязнения водоема AMWI, показывающее содержание железа в воде, также соответствует изменениям спектральных кривых на рис. 2. Значения индекса на участках, рассчитанные по фоновым снимкам 2017 года, отрицательны. На снимках после аварии на всех участках реки

ниже источника загрязнения значения положительны, при этом максимальные значения индекса AMWI соответствуют близким к источнику аварии участкам и датам. Это показывает, что после аварии содержание железа в воде увеличилось на всех исследуемых участках по течению реки. Например, участок «Кобяйский» находится дальше всех от места аварии, соответственно, там индекс AMWI ниже, чем во всех остальных участках. В работе [16] приводятся результаты лабораторного анализа отбора проб воды на исследуемых участках, который показывает, что концентрация взвешенных веществ в воде со временем и по мере удаления от эпицентра разрушенной дамбы уменьшается, в то же время существенно превышает нормативные требования, что согласуется с полученными нами результатами дешифрирования спутниковой информации. Предлагаемый в данной статье метод полезен для оперативной оценки экологического ущерба водным ресурсам на удаленных и труднодоступных территориях.

По результатам исследования были построены карты различий для исследуемых участков реки [18]. Карта различий строится по разновременным снимкам. Разновременные данные были предварительно взаимно геометрически увязаны, также была выполнена нормализация входных изображений и стандартизация их в программной среде ENVI. Это означает, что нормализация вычитает минимум изображения и делит его на диапазон данных изображения, стандартизация вычитает среднее значение изображе-

ния и делит его на стандартное отклонение. Сравнение полученных результатов показало, что нормализация дает более точный результат, т.к. используется весь диапазон значений, в то время как стандартизация использует среднее значение яркости и стандартное отклонение [9, 16].

Заключение

Результаты исследований показали, что использование спектральных характеристик позволяет отследить наличие взвешенных частиц в воде и степень их загрязнения, используя архивные снимки в качестве фоновых. На примере участка реки Ирелях показано, что степень загрязнения постепенно уменьшается от места аварии до последнего по ходу течения реки исследуемого участка, но остается намного выше, чем на фоновом, количество взвешенных частиц в воде превышает фоновое в 2–3 раза.

Наиболее информативным для оценки загрязнения поверхностных вод является разность яркости в синем и красном диапазонах спектра, в которых производился расчет индекса AMWI. Благодаря этому индексу можно увидеть, что содержание железа в воде меняется (по максимальным данным) по течению реки Вилюй. Предложенная методика может применяться для оперативной оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций и отслеживания процесса загрязнения на труднодоступных территориях Севера и Арктики, своевременного оповещения населения об ухудшении экологической ситуации и принятия превентивных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березина О. А., Шихов А. Н., Абдуллин Р. К. Применение многолетних рядов данных космической съёмки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна) // Совре-

менные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. — Т. — 15. — № 2. — С. — 144—158. DOI: 10.21046/2070—7401—2018—15—2-144—158.

2. *Буканов В. И.* Организация и результаты спутникового мониторинга нефтяных загрязнений в юго-восточной части Балтийского моря // *Геоматика*. — 2011. — № 1(10). — С. 55—57.

3. *Chuanmin Hu.* Remote detection of marine debris using satellite observations in the visible and near infrared spectral range // *Challenges and potentials Remote Sensing of Environment*. — 2021. — Volume 259, 15 June 2021, doi 112414.

4. *Christopher B. Obida, George A. Blackburn, James D. Whyatt, Kirk T. Semple.* Counting the cost of the Niger Delta's largest oil spills // *Science of The Total Environment*, 2021, Volume 775, 25 June 2021, doi 145854.

5. *Шихов А. Н., Герасимов А. П., Пономарчук А. И., Перминова Е. С.* Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]: уч. пособие. Пермь, 2020. <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrirovaniye-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>.

6. *Жуков Д. В.* Спектральные признаки для идентификации типовых загрязнений акваторий морей по данным авиационной и космической съемки // *Оптика атмосферы и океана*. — 2016. — №7. — С. 560—565. DOI: 10.15327/AOO20160705.

7. *Мазурова В. Е.* Оценка экологического риска последствий загрязнения поверхностных вод с использованием материалов дистанционного зондирования. — Автореферат уч. ст. канд. техн. наук. МГУ, Москва. — 2009. — 25с.

8. *Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Андреева Н. В.* Мониторинг загрязнений водного бассейна районов активной угледобычи с использованием данных дистанционного зондирования // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2012. — № 5. — С. 181—188.

9. *Zehra Yigit Avdan, Gordana Kaplan, Serdar Goncu, Ugur Avdan.* Monitoring the water quality of small water bodies using high-resolution remote sensing data // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019, 8, 553; DOI: 10.3390/ijgi8120553.

10. *Simon N. Topp, Tamlin M. Pavelsky, Daniel Jensen, Marc Simard and Matthew R. V. Ross.* Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: moving towards multidisciplinary applications // *Water* 2020, 12, 169; doi:10.3390/w12010169

11. *Rei Liu, Tao Xie, Qiao Wang, Honghua Li.* Space-earth based integrated monitoring system for water environment // *International Society for Environmental Information Sciences 2010 Annual Conference (ISEIS) Published by Elsevier*. DOI:10.1016/j.proenv.2010.10.141

12. *Ni-Bin Chang, Sanazimen, Benjamin Vannah.* Remote Sensing for Monitoring Surface Water Quality status sand ecosystems state in relation to the nutrient cycle: A 40-year perspective // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45:101—166, 2015. DOI: 10.1080/10643389.2013.829981


13. *Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Андреева Н. В.* Использование данных дистанционного зондирования Земли для оценки антропогенного воздействия на водные объекты // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2013. — Отдельный выпуск №6. — С. 475—481.

14. <https://minpriroda.sakha.gov.ru/news/front/view/id/2937010>

15. *Капитонова Т. А., Тихонова С. А., Стручкова Г. П.,* Использование спектральных характеристик спутниковых данных для оценки загрязнения водных ресурсов на реке Вилюй // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. — 2020. — № 6. С. 22—29. DOI: 10.36535/0869—4176—2020—06—2.

16. *Токарева О. С.* Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. — 111 с.

17. Yan C., Liu R., Liu S., Wu L., Liu S., Study of remote sensing index indicators about the mine environment evaluation, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004 (IGARSS'04), Proceedings, 2004, Vol. 1, pp. 579–581.

18. Капитонова Т. А., Тихонова С. А., Стручкова Г. П. Использование спектральных характеристик спутниковых данных для оценки загрязнения водных ресурсов на реке Вилюй // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2020. — № 6. С. 22–29. DOI: 10.36535/0869–4176–2020–06–2. 

REFERENCES

1. Berezina O. A., Shikhov A. N., Abdullin R. K. The use of multi-temporal satellite images for environmental assessment in coal mining areas (by closed kizel coal basin). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, no. 2, pp. 144–158. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-144–158. [In Russ].

2. Bukanov V. I. Organization and results of satellite monitoring of oil pollution in the southeastern part of the Baltic Sea. *Geomatics*, 2011, Vol. 10, no. 1, pp. 55–57. [In Russ].

3. Chuanmin Hu. Remote detection of marine debris using satellite observations in the visible and near infrared spectral range. *Challenges and potentials Remote Sensing of Environment*. 2021. Vol. 259, 15 June 2021, DOI 112414.

4. Christopher B. Obida, George A. Blackburn, James D. Whyatt, Kirk T. Semple. Counting the cost of the Niger Delta's largest oil spills. *Science of The Total Environment*, 2021, Volume 775, 25 June 2021, DOI 145854.

5. Shikhov A. N., Gerasimov A. P., Ponomarchuk A. I., Perminova E. S. *Thematic decoding and interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution* [Electronic resource]: textbook. Perm, 2020. Perm State National Research University. Electronic data. Perm, 2020 49.6, 191 p.: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>. [In Russ].

6. Zhukov D. V. Spectral features for identification of typical pollution of sea water from aviation and space survey data. *Optika atmosfery i okeana*. 2016, no. 7, pp. 560–565. [In Russ].

7. Mazurova V. E. *Oценка экологического риска последствий загрязнения поверхностных вод с использованием материалов дистанционного зондирования* [Assessment of the environmental risk of the consequences of surface water pollution using remote sensing materials]. Abstract account. Art. Cand. tech. sciences. MGU, Moscow, 2009, 25 p. [In Russ].

8. Oparin V. N., Potapov V. P., Giniyatullina O. L., Andreeva N. V. Monitoring of pollution of the water basin of active coal mining areas using remote sensing data. *Journal of Mining Science*, 2012, no. 5, pp. 181–188. [In Russ].

9. Zehra Yigit Avdan, Gordana Kaplan, Serdar Goncu, Ugur Avdan. Monitoring the water quality of small water bodies using high-resolution remote sensing data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019, 8, 553; DOI: 10.3390/ijgi8120553.

10. Simon N. Topp, Tamlin M. Pavelsky, Daniel Jensen, Marc Simard and Matthew R. V. Ross. Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: moving towards multidisciplinary applications. *Water* 2020, 12, 169; DOI: 10.3390/w12010169.

11. Rei Liu, Tao Xie, Qiao Wang, Honghua Li. Space-earth based integrated monitoring system for water environment. *International Society for Environmental Information Sciences 2010 Annual Conference (ISEIS)* Published by Elsevier. DOI:10.1016/j.proenv.2010.10.141

12. Ni-Bin Chang, Sanazimen, Benjamin Vannah. Remote Sensing for Monitoring Surface Water Quality status and ecosystems state in relation to the nutrient cycle: A 40-year perspective. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45:101–166, 2015. DOI: 10.1080/10643389.2013.829981

13. Potapov V. P., Giniyatullina O. L., Andreeva N. V. Use of Earth remote sensing data to assess anthropogenic impact on water bodies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013. no. S6. pp. 475 – 481. [In Russ].

14. <https://minpriroda.sakha.gov.ru/news/front/view/id/2937010>

15. Kapitonova T. A., Tikhonova S. A., Struchkova G. P. Using the spectral characteristics of satellite data to assess water pollution on the Vilyui river. *Safety and Emergencies Problems*, 2020, no. 6, pp. 22 – 29. DOI: 10.36535/0869 – 4176 – 2020 – 06 – 2.

16. Tokareva O. S. *Obrabotka i interpretaciya dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli* [Processing and interpretation of Earth remote sensing data]: a tutorial. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010, 111 p. [In Russ].

17. Yan C., Liu R., Liu S., Wu L., Liu S., Study of remote sensing index indicators about the mine environment evaluation, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004 (IGARSS'04), Proceedings, 2004, Vol. 1, pp. 579–581.

18. Kapitonova T. A., Tikhonova S. A., Struchkova G. P. Using the spectral characteristics of satellite data to assess water pollution on the Vilyui river. *Safety and Emergencies Problems*, 2020, no. 6, pp. 22 – 29. DOI: 10.36535/0869-4176-2020-06-2. In Russ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Тихонова Сардана Алексеевна*¹ – ведущий инженер, <http://orcid.org/0000 – 0002 – 5737 – 2409>, e-mail: sardankobeleva@gmail.com;

*Стручкова Галина Прокопьевна*¹ – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: pandoramy8@list.ru;

*Капитонова Тамара Афанасьевна*¹ – канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, <http://orcid.org/0000-0001-5502-0998>, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru;

¹ ФИЦ Якутский научный центр СО РАН Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, 677980 Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия.

Для контактов: *Стручкова Г. П.*, e-mail: pandoramy8@list.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Tikhonova S. A.*¹, Lead Engineer, sardankobeleva@gmail.com;

*Struchkova G. P.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, pandoramy8@list.ru;

*Kapitonova T. A.*¹, Cand. Sci. (Phys.-mat.), Leading Researcher, kapitonova@iptpn.ysn.ru;

¹ FRC “The Yakut Scientific Centre of SB RAS”, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 677980, Yakutsk, Russia;

Corresponding author: *Struchkova G. P.*, e-mail: pandoramy8@list.ru.

Получена редакцией 18.07.2021; получена после рецензии 19.10.2021; принята к печати 10.11.2021.

Received by the editors 18.07.2021; received after the review 19.10.2021; accepted for printing 10.11.2021.

