

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ЯКУТИИ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ КОСМОСНИМКОВ

С.А. Тихонова¹, Г.П. Стручкова¹, Т.Г. Крупнова², Т.А. Капитонова¹, О.В. Ракова²

¹ ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия, e-mail pandoramy8@list.ru

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация: Проведены исследования оценки воздействия антропогенных разливов на качество воды в реке. Рассмотрена возможность применения данных дистанционного зондирования для оценки загрязнения водных объектов на территории Республики Саха (Якутия) тяжелыми металлами на примере масштабного загрязнения рек Ирелях, Малая Ботуобия и Виллой после прорыва дамб дражных котлованов на месторождении «Иреляхская россыпь». Ущерб, нанесенный водным экосистемам, по оценке министерства экологии Республики, составляет около 30 млрд руб. В целом, все производственные объекты горнодобывающих компаний используют в рабочем технологическом процессе большие объемы высокоминерализованных рассолов и представляют опасность для окружающей природной среды. На основе синтеза каналов обработанных снимков спутника Sentinel-2 сделана оценка степени загрязнения водного потока тяжелыми металлами. Результаты исследований могут быть использованы для оперативной оценки ущерба от загрязнения, определения размеров загрязнения и скорости его распространения, своевременного оповещения населения об ухудшении экологической ситуации и проведения превентивных и смягчающих последствия мероприятий, что позволит значительно сократить количество отбираемых проб и экспедиционных исследований на труднодоступных территориях Севера.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, спектральные индексы, тяжелые металлы, антропогенные загрязнения, водные объекты, мутность воды.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 121032200040-5, научная тема FWRS-2021-0018) и проекта Российского научного фонда 24-27-20095.

Для цитирования: Тихонова С. А., Стручкова Г. П., Крупнова Т. Г., Капитонова Т. А., Ракова О. В. Оценка загрязнения тяжелыми металлами водных объектов Якутии по спектральным характеристикам космоснимков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 83–92. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_83.

Assessment of heavy metal pollution of Yakutia's water bodies by spectral characteristics of satellite images

S.A. Tikhonova¹, G.P. Struchkova¹, T.G. Krupnova², T.A. Kapitonova¹, O.V. Rakova²

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, Yakutsk, Russia, e-mail pandoramy8@list.ru

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract: The article is a continuation of studies assessing the impact of anthropogenic spills on the water quality in the river. The possibility of using remote sensing data to assess the pollution of water bodies on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) with heavy metals is considered, using the example of large-scale pollution of the rivers Irelyakh, Malaya Botuobia Vilyui after the breakthrough of the dams of the drainage pits at the Irelyakhskaya Placer deposit. The damage caused to aquatic ecosystems, according to the assessment of the Ministry of Ecology of the Republic, is about 30 billion rubles. In general, almost all production facilities in the area of ALROSA's activity belong to objects of increased environmental risk, containing tens of millions of cubic meters of highly mineralized brines and process waters used in the diamond enrichment process. Based on the synthesis of channels of the processed images of the Sentinel-2 satellite, an assessment of the degree of contamination of the water stream with heavy metals was made. The proposed methodology can be used for rapid assessment of damage from pollution, determining the size of pollution foci and the speed of its spread, timely notification of the population about the deterioration of the environmental situation and preventive and mitigating measures, will significantly reduce the number of samples taken and expeditionary research in hard-to-reach areas of the North.

Key words: remote sensing data, spectral indices, heavy metals, anthropogenic pollution, water bodies, water turbidity.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (reg. No. 121032200040-5, scientific topic FWRS-2021-0018) and the project of the Russian Science Foundation 24-27-20095.

For citation: Tikhonova S. A., Struchkova G. P., Krupnova T. G., Kapitonova T. A., Rakova O. V. Assessment of heavy metal pollution of Yakutia's water bodies by spectral characteristics of satellite images. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):83-92. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_83.

Введение

В настоящее время проблема антропогенного загрязнения водной среды носит глобальный характер и занимает первостепенное место среди угроз здоровью и жизни людей, а также всему живому миру планеты. С этой точки зрения добыча природных минеральных ресурсов неизбежно приводит к негативно-

му воздействию на окружающую среду. Крайне неблагоприятное влияние на ее состояние оказывает открытый способ добычи полезных ископаемых [1]. Для северных регионов страны, где экология слабоустойчива к антропогенным воздействиям, и требуется длительный период времени для полноценной реабилитации природной среды, изучение

воздействия горнодобывающей деятельности на компоненты природной среды особенно актуально.

При промышленной добыче полезных ископаемых, случайные разливы хвостохранилищ или разрушения плотин оказывают разрушительное воздействие на людей и экосистемы, особенно вдоль речных коридоров. В последние годы для определения масштабов загрязнений и мониторинга динамики изменений окружающей среды [2 – 5] начали активно использовать методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые в определенных случаях, когда места загрязнения труднодоступны или требуется оперативно оценить геоэкологическое состояние обширных территорий, могут заменить методы отбора проб и лабораторного анализа [6].

В настоящее время многие исследователи, как российские, так и зарубежные, используют методы дистанционного зондирования в работах по определению антропогенного загрязнения горнодобывающими предприятиями [7 – 9] территорий и водных систем [10 – 13]. На эффективность дешифрирования влияет выбор математических и технологических подходов, корректных наземных данных для контроля и верификации, учитывающих географические особенности местности.

В этой работе мы продолжаем исследование [14, 15] оценки воздействия антропогенных разливов на качество воды на примере инцидента, произошедшего на р. Ирелях в августе 2018 г. Оценка качества воды на основе дистанционного зондирования в предыдущих работах в основном фокусировались на определении степени мутности и концентрации взвешенных отложений.

Целью данного исследования является оценка антропогенного загрязнения северных рек тяжелыми металлами с использованием спектральных характе-

ристик спутниковых снимков. Применимость подходов и методов обработки и анализа данных ДЗЗ исследовалась на примере загрязнения р. Виллой и ее притоков вследствие катастрофической аварии дамб дражных полигонов алмазодобывающих предприятий.

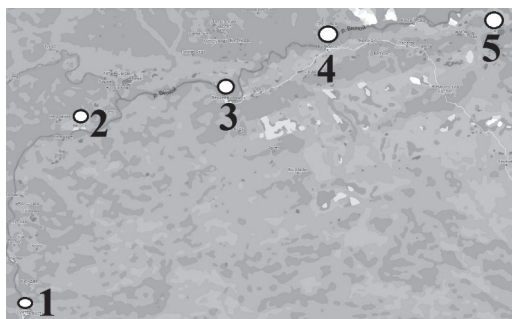
Методы и материалы

Содержание взвешенных твердых частиц в водных объектах при аварии хвостохранилищ позволяет оценить уровень загрязнения. Частицы грунта, взвешенные в воде, потенциально могут адсорбировать токсичные металлы и макроэлементы и способствовать транспортировке этих элементов на большие расстояния. С этой точки зрения спутниковые снимки могут предоставить полезную информацию для многовременного анализа пострадавших районов [16, 17].

19 августа 2018 г. произошел прорыв дамб дражных котлованов на месторождении «Иреляхская россыпь» вблизи р. Ирелях. Область исследования включала р. Виллой, начиная с Сунтарского до Кобяйского улуса.

Река Виллой является одним из крупных притоков Лены. Питание речной системы смешанное, с небольшим преобладанием снегового. Начало Виллой берет на Среднесибирском плоскогорье, длина реки составляет 2450 км, площадь бассейна — 454 км². На всем протяжении река очень извилиста. Тестовые участки расположены в 100 – 170 км друг от друга. Более подробно расположение исследуемых участков р. Виллой представлено в предыдущих работах [14, 15] и на рисунке.

Для обнаружения взвешенных частиц (железа, цинка, меди, свинца, хрома, кадмия) в воде были использованы снимки спутника Sentinel-2 (<https://apps.sentinel-hub.com/>). Снимки за 2018 г. до аварии и после аварии, а также за предыдущий год (2017) — для фона. Расчеты произ-



Тестовые участки реки Вилюй, расположенные на территории районов: 1 – Сунтарского; 2 – Нюрбинского; 3 – Верхневилуйского; 4 – Вилюйского; 5 – Кобяйского [15]

Test sections of the Vilyui River, located in the areas of: 1 – Suntarsky; 2 – Nyurbinsky; 3 – Verkhnevilyuysky; 4 – Vilyuisky; 5 – Kobyaisky [15]

водились на программном комплексе ENVI 5.3. Сформированный набор из космоснимков покрывает территорию Сунтарского, Верхневилуйского, Вилюйского, Нюрбинского, Кобяйского районов.

Sentinel-2 – это спутник Европейского космического агентства (ЕКА), имеет оптико-электронный мультиспектральный сенсор с разрешением от 10 до 60 м в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающий в себя 13 спектральных каналов. Периодичность съемок – 5 дней на экваторе и каждые 2–3 дня в средних широтах.

Распознавание различных объектов при дешифрировании спутниковых снимков выполняется на основании анализа различий в спектральных характеристиках отраженного от объекта электромагнитного излучения, измеренного датчиками и съемочной аппаратурой.

Анализ дешифрирования мультиспектральных снимков позволяет определять, наблюдать и прогнозировать распространение пятен выбросов загрязнений на изображениях, оценивать акваторию реки по степени загрязненности [18]. Большинство загрязнителей тяжелыми металлами не оказывают прямого влияния на оптические свойства

воды; однако их распределение влияет на такие свойства воды, как pH, температура, общее содержание взвешенных веществ (TSS) и мутность (T_{10}). Как правило, тяжелые металлы транспортируются и распределяются вместе со взвешенными, особенно мелкодисперсными, частицами. Концентрация TSS может быть использована для косвенной оценки концентраций тяжелых металлов (НМ) в водоеме [19, 20].

Концентрации вредных веществ в речной воде после аварии, как показали результаты наземных лабораторных исследований, значительно (более 700 раз) превышали нормативы предельно допустимых. Расчеты негативных для р. Вилюй последствий был оценен более чем в 20 млрд руб. [21].

Чтобы установить степень загрязнения воды, использовались спектральные признаки, позволяющие исследовать изменения оптических плотностей, вызываемых растворами и взвесями органических и неорганических веществ [18].

Предварительно была выполнена геометрическая, радиометрическая и атмосферная коррекция. Были определены тестовые участки на реках Ирелях, Малая Ботуобуя и Вилюй; определены фоновые данные; собраны разновременные (с 20 августа по 4 сентября 2018 г.)

снимки спутника Sentinel-2, после дешифрирования которых полученные для тестовых участков индексы сравнивались с результатами наземных лабораторных и фоновых данных.

Использовались регрессионные зависимости, полученные методами многомерной линейной и нелинейной регрессии, между спектральными характеристиками отраженной поверхности, извлеченными из изображений спутника Landsat и концентрациями тяжелых металлов, измеренными лабораторным способом авторами работы [19].

Сначала вычисляли индекс мутности воды по формуле:

$$\log(T_u) = -30 * (L_3)^{1,02} + 29,9 * (L_4)^{0,62} - 4,67 * \left(\frac{L_3}{L_4}\right)^{-0,72} + 2,24,$$

где T_u – мутность, выраженная в нефелометрических единицах мутности (NTU); L_3 – green (543–578 nm), L_4 – red (650–680 nm) – спектральные диапазоны спутниковых снимков Sentinel-2.

Далее использовали формулы:

$$TSS = 2,73 * (T_u)^{0,98} + 4,63, \text{ если } T_u \leq 50;$$

$$TSS = 4,37 * (T_u)^{0,83}, \text{ если } 50 < T_u < 200;$$

$$TSS = 0,22 * (T_u)^{1,12} + 135,84, \text{ если } T_u \geq 200.$$

Формулы соотношения между концентрацией тяжелого металла и TSS :

$$Fe = 20,27 * (TSS)^{1,008},$$

$$Zn = 3,98 * (TSS)^{0,43} + 16,$$

$$Cu = 1,084 * (e0,013)^{TSS},$$

где концентрации TSS выражены в мг/л, а концентрации Fe, Zn, Cu указаны в мкг/л.

Результаты

Оценка загрязнения реки была выполнена с использованием классификации с обучением методом спектрального угла [8] в программе ENVI.

В предыдущих работах авторов приводились результаты, полученные сравнением спектральной кривой воды до и после прорыва дамбы, и с использованием индекса AMWI (Acid Mine Water Index) [14, 15]. Оценки мутности, полученные на основе дешифрирования космоснимков, показали, что разлив дражных котлованов оказал серьезное и продолжительное воздействие на качество воды. Значения мутности увеличились на несколько порядков, что свидетельствует о серьезности последствий разлива [14, 15]. Значения концентраций тяжелых металлов в воде, полученные с использованием данных ДЗЗ сравниваются с данными лабораторных измерений, выполненных лабораторией Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия), которые приводятся в кратности превышения концентрации тяжелых металлов ПДК_{р/х} [21]. Стандарты допустимых

Таблица 1

Значения ПДК химических веществ в водоемах хозяйственно-питьевого (ПДК_в) и рыбохозяйственного назначения (ПДК_{р/х})

Values of MPC of chemical substances in water bodies for household and drinking (MPC_{NDP}) and fishery purposes (MPC_{FP})

Вещество	ПДК _в , мг/дм ³	ПДК _{р/х} , мг/дм ³
Железо (Fe)	0,3	0,1
Медь (Cu)	1,0	0,001
Цинк (Zn)	1,0	0,01

Таблица 2

Динамика изменения концентраций тяжелых металлов в воде р. Вилюй в районе с. Нюрба (в кратности превышения от ПДК_{р/х} и ПДК_в), полученные по данным лабораторных измерений и с использованием снимков Sentinel-2 до и после аварии в 2018 г.
Dynamics of change of heavy metals concentrations in the water of the Vilyui River near Nyurba village (in multiples of exceedance from MPC_{FP} and MPC_{HDP}), obtained from laboratory measurements and Sentinel-2 images before and after the accident in 2018

	19.08. 2017	20.08. 2018	22.08. 2018	24.08. 2018	25.08. 2018	26.08. 2018	29.08. 2018	30.08. 2018	31.08. 2018	01.09. 2018	02.09. 2018
по данным лабораторных измерений ПДК_{р/х}											
железо	н/д	н/д	2,3	4,9	5,6	7,2	8,1	44,8	38,7	32,2	16,7
медь	н/д	н/д	0	3,5	2,5	3,3	0	4,6	9,2	2,13	0,9
цинк	н/д	н/д	1,2	2,9	3,8	3,8	3,4	3	3,9	0	0
марганец	н/д	н/д	1	1,1	1,3	1,7	1,1	16,6	21,3	7,3	10,4
с использованием снимков Sentinel-2 и рыбохозяйственного ПДК_{р/х}											
железо	17,42	41,72	н/д	н/д	32,87	н/д	н/д	97,06	н/д	50,38	н/д
медь	2,68	13,85	н/д	н/д	8,1	н/д	н/д	39,79	н/д	23,39	н/д
цинк	2,492	3,878	н/д	н/д	3,505	н/д	н/д	5,552	н/д	4,201	н/д
с использованием снимков Sentinel-2 и хозяйственно-питьевого ПДК_в											
железо	5,81	13,91	н/д	н/д	10,96	н/д	н/д	32,35	н/д	16,793	н/д
медь	0,02	0,0388	н/д	н/д	0,035	н/д	н/д	0,05552	н/д	0,04	н/д
цинк	0,003	0,014	н/д	н/д	0,0081	н/д	н/д	0,04	н/д	0,023	н/д

значений концентрации тяжелых металлов в водоемах хозяйственно-питьевого (ПДК_в) и рыбохозяйственного назначения (ПДК_{р/х}) приведены в табл. 1.

В качестве примера в табл. 2 представлены результаты исследования — кривые концентрации тяжелых металлов в воде на участке р. Вилюй в районе с. Нюрба (в кратности превышения от ПДК_{р/х}) после прорыва дамбы в различные моменты времени, — полученные с использованием снимков Sentinel-2 и хозяйственно-питьевого ПДК_в; с использованием снимков Sentinel-2 и ПДК_{р/х} рыбохозяйственного назначения, а также по данным лабораторных измерений [21].

Анализ показал, что при использовании ПДК_{р/х} результаты наземного и спутникового исследования различаются почти в 2 раза по содержанию железа,

меди и цинка. При использовании ПДК_в для спутниковых данных значения получаются более близкими к данным наземных лабораторий, но при этом немного заниженными (см. совпадающие даты в табл. 2). Значения данных ДЗЗ на 2017 г. приводятся в качестве фоновых. В целом максимальные значения совпадают (они приходятся на дату 30.08.2018), и качественно динамика изменения концентраций тяжелых металлов во всех представленных случаях хорошо согласуется. Разница в результатах наземных и спутниковых исследований объясняется тем, что при дешифрировании спутниковой информации на результат влияет множество факторов, таких как глубина и ширина реки, природные взвешенные вещества в воде, растительность и волны на поверхности.

Заключение

В работе продолжены исследования возможностей использования данных дистанционного зондирования Земли для оценки загрязнения водных объектов при разливах хвостохранилищ, дамб дражных котлованов месторождений и дополнения базы наземных лабораторных фактических данных в труднодоступных регионах. Сравнения результатов наземного анализа проб воды и дешифрирования спутниковой информации в опорных точках показал разные значения концентраций тяжелых металлов в зависимости от использования ПДК_{р/х} и ПДК_в, но качественно ди-

намика изменения концентраций в этих случаях хорошо согласуется.

Предложенная методика оценки качества воды может быть полезна как при принятии решений во время и после аварийных антропогенных загрязнений водных объектов, для быстрой и эффективной оценки ущерба, наблюдений за процессом, особенно на обширных и труднодоступных территориях, своевременного информирования жителей об опасности, так и при постоянном мониторинге промышленных вод, для проведения превентивных мероприятий и обеспечения устойчивой системы водоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гололобова А. Г., Легостаева Я. Б. Экогеохимический мониторинг почвенного покрова на участках алмазодобычи в Западной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 12. — С. 146–157.
2. Березина О. А., Шихов А. Н., Абдуллин Р. К. Применение многолетних рядов данных космической съемки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15. — № 2. — С. 144–158. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-144-158.
3. Буканов В. И. Организация и результаты спутникового мониторинга нефтяных загрязнений в юго-восточной части Балтийского моря // Геоматика. — 2011. — № 1(10). — С. 55–57.
4. 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, article 112414. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112414.
5. Obida C. B., Blackburn G. A., Whyatt J. D., Semple K. T. Counting the cost of the Niger Delta's largest oil spills // Science of the Total Environment. 2021, vol. 775, article 145854. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145854.
6. Сутырина Е. Н. Изучение внутренних водоемов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. — Иркутск, Изд-во ИГУ, 2014. — 133 с.
7. 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.
8. Мазурова В. Е. Оценка экологического риска последствий загрязнения поверхностных вод с использованием материалов дистанционного зондирования: Автореф. ... канд. техн. наук. — М.: МГУ, 2009. — 25 с.
9. 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.
10. 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, vol. 8, article 553. DOI: 10.3390/ijgi8120553.

11. Topp S. N., Pavelsky T. M., Jensen D., Simard M., Ross M. R. V. Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: moving towards multidisciplinary applications // *Water*. 2020, vol. 12, article 169. DOI:10.3390/w12010169.

12. Rei Liu, Tao Xie, Qiao Wang, Honghua Li Space-earth based integrated monitoring system for water environment // *Procedia Environmental Sciences*. 2010, vol. 2, pp. 1307–1314. DOI: 10.1016/j.proenv.2010.10.141.

13. Ni-Bin Chang, Sanaz Imen, 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*. 2015, vol. 45, pp. 101–166. DOI: 10.1080/10643389.2013.829981.

14. 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.

15. 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.

16. Thayrinne K., Coimbra O., Alcântara E., de Souza Filho C. R. Satellite evidence for pervasive water eutrophication in the Doce River reservoirs following the collapse of the Fundao dam in Brazil // *Environmental Pollution*. 2020, vol. 272, article 116014. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116014.

17. Cheng D., Cui Y., Li Z., Iqbal J. Watch out for the tailings pond, a sharp edge hanging over our heads: Lessons learned and perceptions from the brumadinho tailings dam failure disaster // *Remote Sensing*. 2021, vol. 13, no. 9. DOI: 10.3390/rs13091775.

18. 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.

19. Ratnakar Swain, Bhabagrahi Sahoo Mapping of heavy metal pollution in river water at daily time-scale using spatio-temporal fusion of MODIS-aqua and Landsat satellite imageries // *Journal of Environmental Management*. 2017, vol. 192, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.01.034.

20. Ruppen D., Runnalls J., Tshimanga R., Wehrli B., Odermatt D. Optical remote sensing of large-scale water pollution in Angola and DR Congo caused by the Catoca mine tailings spill // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023, vol. 118, article 103237. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103237.

21. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2018 г. Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия). – 2018. – 671 с. **ИЯС**

REFERENCES

1. Gololobova A. G., Legostaeva Ya. B. Ecogeochemical monitoring of soil cover at diamond mining sites in Western Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020, vol. 331, no. 12, pp. 146–157. [In Russ].

2. Berezina O. A., Shikhov A. N., Abdullin R. K. Application of long-term data series of satellite imagery to assess the environmental situation in coal-mining areas (on the example of the liquidated Kizelovsky coal basin). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018, vol. 15, no. 2, pp. 144–158. [In Russ]. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-144-158.

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

4. 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, article 112414. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112414.

5. Obida C. B., Blackburn G. A., Whyatt J. D., Semple K. T. Counting the cost of the Niger Delta's largest oil spills. *Science of the Total Environment*. 2021, vol. 775, article 145854. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145854.

6. Sutyryna E. N. *Izuchenie vnutrennikh vodoemov i vodosborov s primeneniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [The study of inland reservoirs and catchments using remote sensing data of the Earth], Irkutsk, Izd-vo IGU, 2014, 133 p.

7. 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]. DOI: 10.15327/AOO20160705.

8. Mazurova V. E. *Otsenka ekologicheskogo riska posledstviy zagryazneniya poverkhnostnykh vod s ispol'zovaniem materialov distantsionnogo zondirovaniya* [Assessment of the environmental risk of the consequences of surface water pollution using remote sensing materials], Candidate's thesis, Moscow, MGU, 2009, 25 p.

9. 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. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no. 5, pp. 181–188. [In Russ].

10. 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, vol. 8, article 553. DOI: 10.3390/ijgi8120553.

11. Topp S. N., Pavelsky T. M., Jensen D., Simard M., Ross M. R. V. Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: moving towards multidisciplinary applications. *Water*. 2020, vol. 12, article 169. DOI:10.3390/w12010169.

12. Rei Liu, Tao Xie, Qiao Wang, Honghua Li Space-earth based integrated monitoring system for water environment. *Procedia Environmental Sciences*. 2010, vol. 2, pp. 1307–1314. DOI: 10.1016/j.proenv.2010.10.141.

13. Ni-Bin Chang, Sanaz Imen, 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*. 2015, vol. 45, pp. 101–166. DOI: 10.1080/10643389.2013.829981.

14. 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. [In Russ]. DOI: 10.36535/0869-4176-2020-06-2.

15. Tikhonova S. A., Struchkova G. P., Kapitonova T. A. Assessment of anthropogenic pollution of Yakutia reservoirs by spectral characteristics of satellite images. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 12-1, pp. 213–222. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_213.

16. Thayrinne K., Coimbra O., Alcântara E., de Souza Filho C. R. Satellite evidence for pervasive water eutrophication in the Doce River reservoirs following the collapse of the Fundao dam in Brazil. *Environmental Pollution*. 2020, vol. 272, article 116014. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116014.

17. Cheng D., Cui Y., Li Z., Iqbal J. Watch out for the tailings pond, a sharp edge hanging over our heads: Lessons learned and perceptions from the brumadinho tailings dam failure disaster. *Remote Sensing*. 2021, vol. 13, no. 9. DOI: 10.3390/rs13091775.

18. Oparin V. N., Potapov V. P., Giniyatullina O. L. Andreeva N. V. Water body pollution monitoring in vigorous coal extraction areas using remote sensing data of water basin pollution in areas of active coal mining using remote sensing data. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no. 5, pp. 181–188. [In Russ].

19. Ratnakar Swain, Bhabagrahi Sahoo Mapping of heavy metal pollution in river water at daily time-scale using spatio-temporal fusion of MODIS-aqua and Landsat satellite imageries. *Journal of Environmental Management*. 2017, vol. 192, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.01.034.

20. Ruppen D., Runnalls J., Tshimanga R., Wehrli B., Odermatt D. Optical remote sensing of large-scale water pollution in Angola and DR Congo caused by the Catoca mine tailings spill. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023, vol. 118, article 103237. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103237.

21. Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii okruzhayushchey sredy Respubliki Sakha (Yakutiya) v 2018 g. *Ministerstvo ekologii, prirodnopol'zovaniya i lesnogo khozyaystva Respubliki Sakha (Yakutiya)* [State report on the state of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2018 Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the Republic of Sakha (Yakutia)], 2018, 671 p. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Тихонова Сардана Алексеевна*¹ – ведущий инженер,

e-mail: sardankobeleva@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-5737-2409,

*Стручкова Галина Прокопьевна*¹ – канд. техн. наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: pandoramy8@list.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5161-979X,

*Крупнова Татьяна Георгиевна*² – канд. хим. наук,

доцент, e-mail: krupnovatg@susu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0862-710X,

*Капитонова Тамара Афанасьевна*¹ – канд. физ.-мат. наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5502-0998,

*Ракова Ольга Викторовна*² – канд. хим. наук,

доцент, e-mail: rakovaov@susu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5788-5933,

¹ ФИЦ Якутский научный центр СО РАН,

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,

² Южно-Уральский государственный университет.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*S.A. Tikhonova*¹, Leading Engineer,

e-mail: sardankobeleva@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-5737-2409,

*G.P. Struchkova*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Leading Researcher, e-mail: pandoramy8@list.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5161-979X,

*T.G. Krupnova*², Cand. Sci. (Chem.),

Assistant Professor, e-mail: krupnovatg@susu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0862-710X,

*T.A. Kapitonova*¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),

Leading Researcher,

e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5502-0998,

*O.V. Rakova*², Cand. Sci. (Chem.),

Assistant Professor, e-mail: rakovaov@susu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5788-5933,

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, Yakutsk, 677980, Russia,

² Chemistry Department, South Ural State University,

Chelyabinsk, 454080, Russia.

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

Получена редакцией 07.03.2024; получена после рецензии 28.05.2024; принята к печати 10.06.2024.

Received by the editors 07.03.2024; received after the review 28.05.2024; accepted for printing 10.06.2024.