

Научная статья  
УДК 502/ 504; 528.88  
DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-2-45-60

## Применение спектральных водных индексов на хвостовом хозяйстве Дарасунского рудника по данным дистанционного зондирования Земли программы Landsat

Денис Владимирович Кочев<sup>1</sup>, Лидия Владимировна Шумилова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

<sup>2</sup>Читинский филиал Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Чита, Россия

<sup>1</sup>denis.ko4ev@yandex.ru, <sup>2</sup>shumilovalv@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию  
07.05.2023

Одобрена после  
рецензирования 22.05.2023

Принята к публикации  
25.05.2023

### Ключевые слова:

техногенное  
месторождение, каскад  
хвостохранилищ, золото,  
мышьяк, дистанционное  
зондирование Земли,  
программа Landsat, водные  
индексы, площадь водных  
зеркал каскадов, модель  
рельефа SRTM

**В** настоящее время в горном кластере не только России, но и мира остро стоит проблема обеспечения экологической безопасности хвостохранилищ и удерживающих их дамб. Лежалые хвосты, размещённые в гидротехническом сооружении, являются техногенными месторождениями и рассматриваются как объект освоения в будущем. Поэтому формирование базы данных площадей водного зеркала чаш каскада хвостохранилищ за продолжительный период эксплуатации с целью анализа и прогноза потенциальных угроз для градообразующего горного предприятия и близлежащих территорий, является актуальной научной проблемой, которую можно решить на основе использования геоинформационных систем и мультиспектральных данных. Объект исследования – комплекс каскадов хвостохранилищ Дарасунского рудника. Цель – пространственно-временная оценка площадей водного зеркала чаш каскада хвостохранилищ Дарасунского рудника за период с 1997 по 2022 г. для прогнозирования экологической безопасности. Задачи исследования: оценка экологической ситуации на Дарасунском руднике; выбор оптимального метода дешифрирования водной поверхности; сбор и формирование архива данных дистанционного зондирования Земли; вычисление спектральных индексов и ретроспективный анализ изменения площади водной поверхности хвостового хозяйства Дарасунского рудника; прогноз вариантов аварийных ситуаций литосферного, гидросферного, аэровоздушного, биологического загрязнений. Произведена пространственно-временная оценка площадей водного зеркала чаш каскада хвостохранилищ для оценки интенсивности использования данных сооружений с построением графиков изменения площадей водной поверхности за 25-летний период. Благодаря разделению хвостохранилища на каскады появилась возможность локально определить наполнение хвостовой пульпой четырёх участков хвостового хозяйства. Полученные данные позволяют производить мониторинг на предмет рационального использования, консервации, остановки эксплуатации гидротехнических сооружений (в частности хвостохранилищ), их влияние на окружающую среду. Применение спектральных водных индексов по данным дистанционного зондирования Земли программы Landsat, позволит прогнозировать и предупреждать аварийные ситуации на хвостохранилище, эксплуатируемом в течение многих десятков лет, предупредить перелив воды через гребень и тело ограждающих дамб.

**Благодарность:** исследования одного из соавторов (Д. В. Кочев) проведены при финансовой поддержке Забайкальского государственного университета, грант № 345-ГР 122031400091-7.

## Original article

## Application of Spectral Water Indices on the Tailings of the Darasunsky Mine According to the Remote Sensing Data of the Landsat Program

Denis V. Kochev<sup>1</sup>, Lidiya V. Shumilova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Transbaikal State University, Chita, Russia

<sup>2</sup>Chita branch of the Institute of Mining named after N. A. Chinakal of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia

<sup>1</sup>denis.ko4ev@yandex.ru, <sup>2</sup>shumilovalv@mail.ru

### Information about the article

Received May 7, 2023

Approved after reviewing  
May 22, 2023

Accepted for publication  
May 25, 2023

### Keywords:

technogenic deposit, cascade of tailings, gold, arsenic, remote sensing of the Earth, Landsat program, water indexes, area of water mirrors of cascades, relief model SRTM

At present, the problem of ensuring the environmental safety of tailings dumps and dams holding them is acute in the mining cluster not only in Russia, but also in the world. Stale tailings located in a hydraulic structure are man-made deposits and are considered as an object of development in the future. Therefore, the formation of a database of the areas of the water mirror of the basins of the cascade of tailings for a long period of operation is an urgent scientific problem. It is important to analyze and predict potential threats to the city-forming mining enterprise and nearby territories. This problem can be solved by using geoinformation systems and multispectral data. The object of the research is a complex of tailings dumps' cascades of the Darasunsky mine. The goal is to provide spatio-temporal assessment of the areas of the water mirror of the basins of the tailings dumps' cascade of the Darasunsky mine for the period from 1997 to 2022 in order to predict environmental safety. The research objectives are the following: assessment of the environmental situation at the Darasunsky mine; selection of the optimal method for decoding the water surface; collection and formation of an archive of remote sensing data; calculation of spectral indices and retrospective analysis of changes in the water surface area of the tailings of the Darasunsky mine; forecast of emergency situations of lithospheric, hydrospheric, airborne, biological pollution. A spatio-temporal assessment of the areas of the water mirror of the basins of the tailing dumps' cascade has been made to assess the use intensity of these structures with the construction of graphs of changes in the areas of the water surface over a 25-year period. Thanks to the division of the tailings storage into cascades, it has become possible to locally determine the filling of 4 tailings sections with tailings pulp. The data obtained allow monitoring for the rational use, conservation, stopping the operation of hydraulic structures (in particular tailings dumps), their impact on the environment. The use of spectral water indices according to the remote sensing data of the Landsat program will allow predicting and preventing emergency situations at the tailings dump, which has been in operation for many decades, to prevent the overflow of water over the crest and body of the enclosing dams.

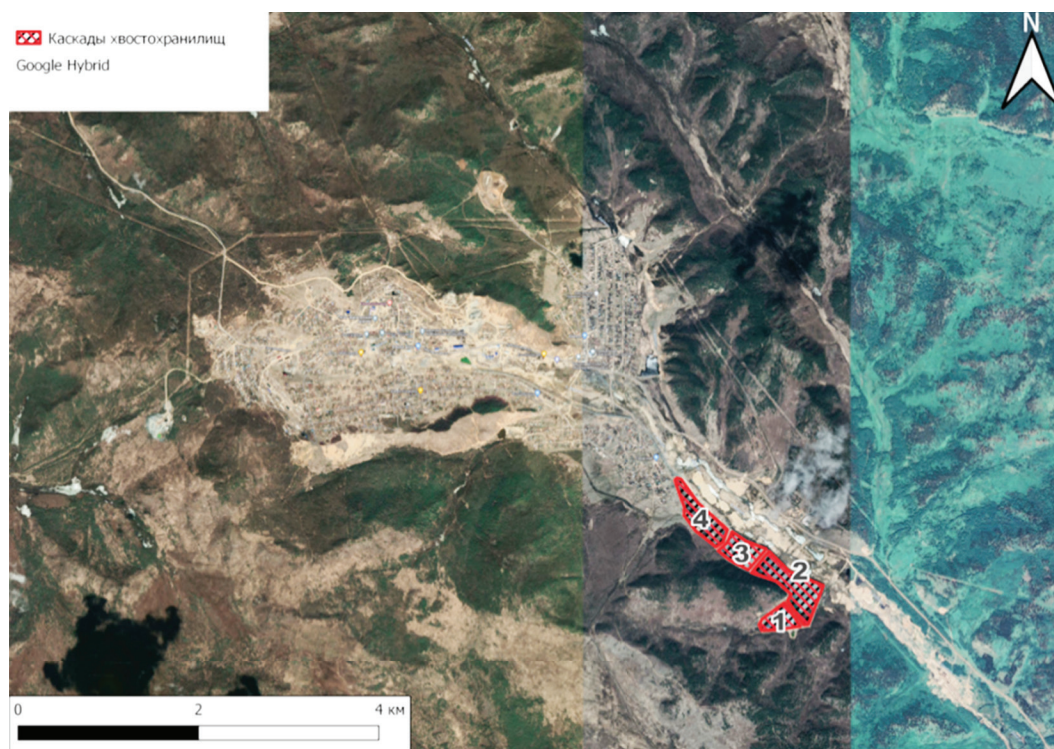
**Acknowledgement:** The research of one of the co-authors (D. V. Kochev) was carried out with the financial support of the Transbaikal State University, grant No. 345-GR 122031400091-7.

**Введение.** Дарасунский рудник (Учредитель ООО «Восток золото» (Highland Gold) – горно-рудное предприятие по добыче и обогащению руд Дарасунского, Талатуйского и Теремкинского месторождений золота (пгт Вершино-Дарасунский Тунгокоченского района, Забайкальский край).

Для складирования техногенных отходов в 1927 г. предприятием, входившим в состав всесоюзного АО «Союззолото», построено первое гидротехническое сооружение, далее по мере эксплуатации, одна часть из них консервировалась, другая часть постепенно расширялась несколькими очередями каскадов хвостохранилищ<sup>1</sup> [8] (рис. 1).

<sup>1</sup> MiningWiki – свободная шахтёрская энциклопедия. – URL: [http://miningwiki.ru/wiki/%D0%94%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%83%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9\\_%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA](http://miningwiki.ru/wiki/%D0%94%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%83%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA) (дата обращения: 10.04.2023). – Текст: электронный.

На 1 января 2018 г. в хвостохранилище Дарасунского рудника, применяемого цианидную технологию, сконцентрировано 1923 тыс. т хвостов флотации, содержащих золото (1308 кг), серебро (1971 кг), медь (5595 т), мышьяк (8019 т). Хвостохранилище располагается в 2 км южнее поселка Вершино-Дарасунский, на правом борту долины р. Дарасун на площади существующего хвостохранилища II очереди и нижней частью примыкает к шламохранилищу. Хвостохранилище состоит из: первой и второй секций III очереди хвостохранилища (соответственно площадью 122 и 200 тыс. м<sup>2</sup>, вместимостью 1513 и 1235 тыс. м<sup>3</sup>, дамба имеет длину 2230 м при ширине поверху 6 м



**Рис. 1.** Снимок Google. Поселок городского типа Вершино-Дарасунский с отмеченными каскадами хвостохранилищ / **Fig. 1.** Google snapshot. Vershino-Darasunsky urban-type settlement with marked cascades of tailings

и высоте до 10 м) с аварийными водосливами. Шламохранилище основное и пусковое, соответственно площадью 78 и 5 тыс. м<sup>2</sup>, вместимостью 261,4 и 13,4 тыс. м<sup>3</sup>, располагается в пяти километрах юго-восточная часть поселка Вершино-Дарасунский, в распадке пади Алаховая I [9–11].

Взаимодействие инженерных сооружений (хвостохранилища и шламохранилища) и геологической среды, необходимо рассматривать в рамках инженерно-геоэкологической системы обмена веществом и энергии между техногенными и природными комплексами и возможных экологических последствий реализации инвестиционно-строительного проекта: литосферное, гидросферное, аэровоздушное и биологическое загрязнения.

**Объект исследования** – комплекс каскадов хвостохранилищ Дарасунского рудника.

**Цель исследования** – пространственно-временная оценка площадей водного зеркала чаш каскада хвостохранилищ Дарасунского рудника за период с 1997 по 2022 г. для и прогнозирования экологической безопасности.

**Задачи исследования:** оценить экологическую ситуацию на Дарасунском руднике; выбрать оптимальный метод дешифрирова-

ния водной поверхности; собрать и сформировать архив данных дистанционного зондирования Земли; вычислить спектральные индексы и – ретроспективный анализ изменения площади водной поверхности хвостового хозяйства Дарасунского рудника; прогноз вариантов аварийных ситуаций литосферного, гидросферного, аэровоздушного, биологического загрязнений.

**Предмет исследования** – спектральные водные индексы NDWI, MNDWI для расчета площади водного зеркала каскада хвостохранилищ.

**Материалы и методы исследования.** Мониторинг водности хвостохранилища позволит оценить его использование, наполняемость чаши пульпой хвостов обогащения руд и оценить возможный риск перелива через гребень ограждающей дамбы. Для измерения площади, занятой водной поверхностью, применялись водные индексы NDWI и MNDWI в виду наименьших вычислительных затрат: NDWI – Normalized Difference Water Index (нормализованный разностный водный индекс), MNDWI – Modified Normalized Difference Water Index (модифицированный-нормализованный разностный водный индекс).

**Разработанность темы.** Сточными водами золотоизвлекательных предприятий является хвостовая пульпа, содержащая в жидкой фазе остаточные количества применяемых реагентов (цианид) и другие вещества, перешедшие из руды в раствор. Цианид – сильнейший неорганический яд. При попадании через пищеварительный тракт смертельная доза для человека 1,7 мг/кг. Наиболее опасна реакция цианида натрия с кислотами, ведущая к образованию смертельно ядовитого газообразного цианистого водорода (HCN), который невидим и обладает крайне слабым запахом [10].

Отечественная и зарубежная практика по обезвреживанию цианидсодержащих сточных вод показывает, что в настоящее время наиболее надёжными методами являются окисление высокотоксичных цианидов и тиоцианатов хлорсодержащими соединениями – гипохлоритами или хлорной известью. Применение других соединений, в частности, озона и перекиси водорода не получило распространения из-за высокой стоимости очистки, отсутствия озонаторов большой про-

изводительности и низкой эффективности окисления цианидов пероксидом водорода. Из новых методов очистки наибольшие перспективы имеют ионообменные и комбинированные технологии очистки, а также способы электролитической деструкции тиоцианатов, позволяющие утилизировать цианид с его повторным использованием [11–15].

В соответствии с нормативным документом «Предельное содержание токсичных соединений в промышленных отходах в накопителях, расположенных вне территории предприятия (организации)», концентрация токсичных соединений в воде хвостохранилища может превышать ПДК в 22–25 раз [1].

Для контроля загрязнения подземных вод в районе расположения предприятия необходимо создать сеть наблюдательных скважин и организовать режимные наблюдения за химизмом и уровнем режимом первого от поверхности горизонта четвертичных аллювиальных отложений в долинах рек и ручьев, а также горизонта пластово-трещинных и трещинно-жильных вод скальных образований (табл. 1) [7; 11].

Таблица 1 / Table 1

Максимальное содержание компонентов в поверхностных водах /  
Maximum content of components in surface waters

Компонент / Component	Месторождение, максимальное содержание, мг/л / Deposit, maximum content, mg/l			
	Чазы-Гол / Chazy-Goal	Майское / Mayskoe	Покровское / Pokrovskoe	ПДК / MPC
Кальций / Calcium	68,0	93,0	12,0	180
Магний / Magnesium	27,4	31,2	9,1	40
Сульфаты / Sulfates	21,9	68,4	21,0	100
Хлориды / Chlorides	6,8	18,8	н. о.	300
Нитраты / Nitrates	2,9	5,8	н. о.	40
Нитриты / Nitrites	0,07	0,03	н. о.	0,08
Аммоний / Ammonium	1,3	0,3	н. о.	0,5
Цианиды / Cyanides	н. о.	н. о.	н. о.	0,05
Тиоцианаты / Thiocyanates	н. о.	н. о.	н. о.	0,09
Медь / Copper	0,003	0,0095	0,008	0,001*
Железо/ Iron	0,0775	0,7	0,28	0,1
Цинк / Zinc	0,013	0,029	0,058	0,01
Мышьяк / Arsenic	0,0029	0,003	0,042	0,05
Свинец / Lead/	0,005	0,025	0,004	ОД
Ртуть / mercury	н. о.	н. о.	н. о.	0,00001
Никель / Nickel	н. о.	н. о.	н. о.	0,01
Кадмий / Cadmium	н. о.	н. о.	н. о.	0,005
Хром / Chrome	н. о.	н. о.	н. о.	0,005
Селен / Selenium	н. о.	н. о.	н. о.	0,016*
Теллур / Tellurium	н. о.	н. о.	н. о.	0,028*
Примечание: н. о. – не обнаружено. * – к природному фону.				

Хвосты флотации и цианирования руд золоторудного месторождения складированы в отвалы и гидроотвалы на границе с территорией поселка Вершино-Дарасунский, граничат с руслом реки Дарасун. Хвосты содержат кроме сульфидов, сульфатов, оксидов и гидроксидов железа, свинца, цинка и меди, большое количество различных цианидов:  $\text{As}(\text{CN})_3$ ,  $\text{S}(\text{CN})_2$ ,  $\text{CuCN}$ ,  $\text{AgCN}$ , цианидные ацидокомплексы, гомолигандные и гетеролигандные комплексы, которые не растворяются в воде и дают устойчивые соединения [11].

По результатам исследования учёных ЧГМА Минздрава России 100 % проб воды поверхностных источников выявлены значительные превышения концентрации меди на уровне 3 ПДК в воде. При сравнении результатов анализа установлено высокое содержание валовых форм изучаемых токсикантов в пробах почвы, отобранных вблизи хвостохранилищ – зафиксированы концентрации, превышающие ПДК по цинку и свинцу до 4–5 раз. Характерная черта почв техногенной нагрузки: значительное увеличение содержания подвижных форм обусловлено подкислением почв и увеличением катиогенности металлов и мышьяка. Приблизительно в районе хвостохранилища обнаружено повышенное содержание подвижных форм свинца (2–3 ПДК) и меди (3–4 ПДК) [1].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Для решения экологических проблем Дарасунского рудника необходимо в первую очередь введение геоэкологического, биологического и социального мониторингов, охватывающих, как территории техногенного ландшафта, так и непосредственно сам горный комплекс [2].

Пространственно-временная оценка площадей водного зеркала чаш каскада хвостохранилищ Дарасунского рудника выполнена за период с 1997 по 2022 г., так как база данных до 1997 г. уже сформирована в Кадастре техногенных скоплений горнорудных предприятий Читинской области (Забайкальский край), отчёт по теме N256 за 1996–1998 гг.». Чита. Авторы: Ю. Ф. Харитонов, В. Г. Васильев.

В настоящее время для целей мониторинга незаменимым источником информации о природных и техногенных процессах становится дистанционное зондирование Земли из космоса (ДЗЗ). Спутниковые системы дистанционного зондирования отличаются разнообразием пространственных, временных и спектральных характеристик, что даёт возможность изучать множество свойств поверхностных водных объектов во всем их многообразии [3–6].

Каскад хвостохранилищ и шламохранилищ Дарасунского рудника с использованием ДЗЗ из космоса представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Снимок Google 2022 г. Каскад хвостохранилищ Дарасунского рудника /  
**Fig. 2.** Google Snapshot 2022 Darasun tailings cascade

На практике наибольшее распространение получили методы дешифрирования объектов на космическом снимке с использованием многоканальных спектральных индексов из-за своей простоты и наименьших вычислительных затрат. В качестве исходных данных ДЗЗ обычно выступают снимки серии Landsat (MSS, TM, ETM+, OLI), которые доступны с 1972 г. по настоящее время с периодичностью 16 дней и пространственным разрешением 15–60 м [5].

Предложен S. K. McFeeters в 1996 г. [13]

$$NDWI = \frac{B2 - B4}{B2 + B4} = \frac{B_{0.56} - B_{0.85}}{B_{0.56} + B_{0.85}}, \quad (1)$$

где В (Band) – соответствующий спектральный канал.

Объекты с отрицательным значением NDWI являются, как правило, рельефом, с положительным NDWI – водой.

MNDWI – Modified Normalized Difference Water Index (модифицированный нормализо-

ванный разностный водный индекс), предложен Н. Ху в 2006 г. [15]

$$MNDWI = \frac{B2 - B5}{B2 + B5} = \frac{B_{0.56} - B_{1.65}}{B_{0.56} + B_{1.65}}, \quad (2)$$

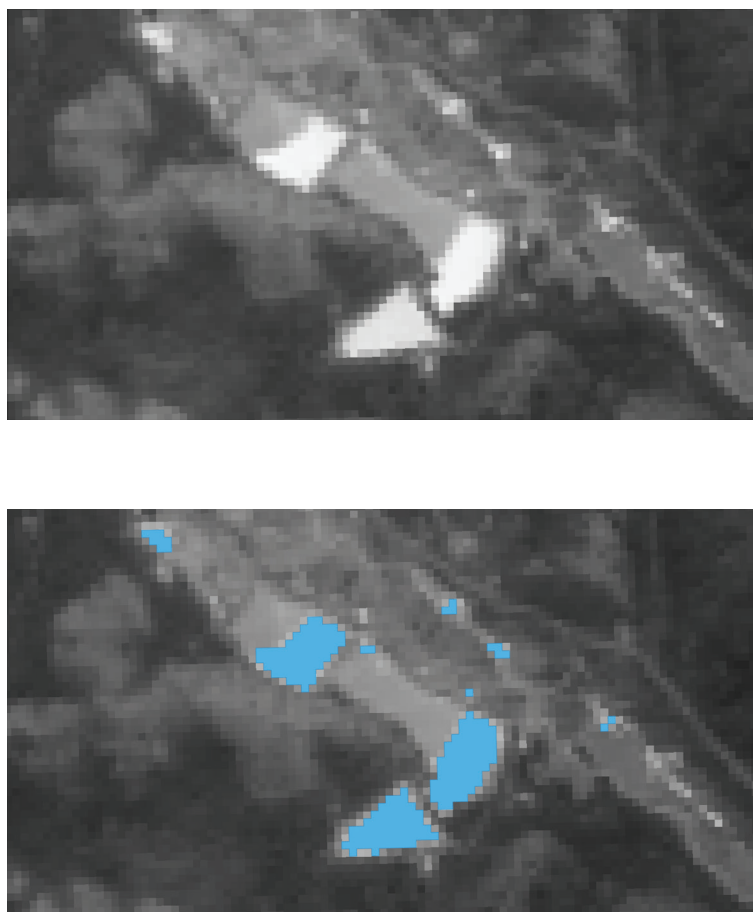
где В (Band) – соответствующий спектральный канал.

Объекты с отрицательным значением NDWI являются, как правило, рельефом, с положительным MNDWI – водой.

Вычисленный и векторизованный MNDWI 2021 представлены на рис. 3.

Для сглаживания полигональных слоёв используется алгоритм упрощения объекта с 50 % сглаживанием в QGIS 3.2. При этом не искажается площадь выделенных объектов (рис. 4).

Для вычисления водных индексов загружены данные Landsat с 1997 по 2022 г. (табл. 2).



**Рис. 3.** Вычисленный и векторизованный MNDWI 2021 / **Fig. 3.** Computed and Vectorized MNDWI 2021



**Рис. 4.** Процесс сглаживания 50 % средствами QGIS 3.2 /  
**Fig. 4.** Smoothing process 50 % using QGIS 3.2

*Таблица 2 / Table 2*

**Данные программы Landsat, используемые в вычислении водных индексов / Landsat data used in calculating water indices**

<i>Год / Year</i>	<i>Используемые мультиспектральные изображения / Used multispectral images</i>	<i>Версия спутника / Satellite Version</i>		
		<i>Landsat 5</i>	<i>Landsat 7</i>	<i>Landsat 8</i>
1997	LT05_L1TP_126024_19970622_20200910_02_T1	*		
1998	LT05_L1TP_127023_19980819_20200908_02_T1	*		
1999	LT05_L1TP_126024_19991002_20200907_02_T1	*		
2000	LE07_L1TP_126024_20000724_20200917_02_T1		*	
2001	LE07_L1TP_126024_20010828_20200917_02_T1		*	
2002	LE07_L1TP_127024_20020603_20200917_02_T1		*	
2003	LT05_L1TP_127024_20030918_20200904_02_T1	*		
2004	LT05_L1TP_126024_20040913_20200903_02_T1	*		
2005	LT05_L1TP_126024_20050831_20200902_02_T1	*		
2006	LT05_L1TP_126024_20060701_20200831_02_T1	*		
2007	LT05_L1TP_126024_20070618_20200830_02_T1	*		
2008	LT05_L1TP_126024_20080706_20200829_02_T1	*		
2009	LT05_L1TP_126024_20090522_20200827_02_T1	*		
2010	LT05_L1TP_126024_20100728_20200824_02_T1	*		
2011	LT05_L1TP_126024_20110613_20200822_02_T1	*		
2012	LE07_L1TP_127023_20120902_20200908_02_T1		*	

Окончание табл. 2 / End the table 2

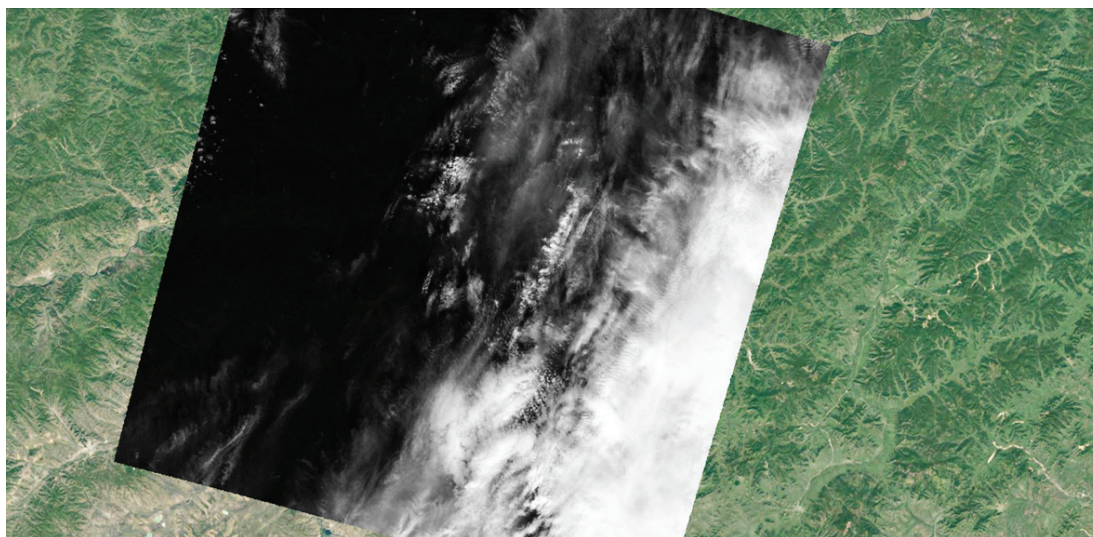
Год / Year	Используемые мультиспектральные изображения / Used multispectral images	Версия спутника / Satellite Version		
		Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
2013	LC08_L1TP_127023_20130828_20200912_02_T1			*
2014	LC08_L1TP_127023_20140628_20200911_02_T1			*
2015	LC08_L1TP_127023_20150903_20200908_02_T1			*
2016	LC08_L1TP_126024_20160829_20200906_02_T1			*
2017	LC08_L1TP_127023_20170908_20200903_02_T1			*
2018	LC08_L1TP_126024_20180531_20200831_02_T1			*
2019	LC08_L1TP_127024_20190829_20200826_02_T1			*
2020	LC08_L1TP_126024_20200707_20200912_02_T1			*
2021	LC08_L1TP_126024_20210928_20211001_02_T1			*
2022	LC08_L1TP_126024_20220627_20220706_02_T1			*

Использование разных версий спутников обусловлено разными периодами эксплуатации аппаратов (например, Landsat 5 работал только до 2012 г.), а также временем съемки и погодными условиями. Высокая облачность препятствует получению информации о подстилающей поверхности (рис. 5).

Вычисленные водные индексы, отфильтрованы в пределах хвостохранилищ, рассчитана площадь каждого вектора за период 1997–2022 гг. (рис. 6). Слои разделены по годам, к которым относится соответствующий цвет. Неправильная эксплуатация гидротех-

нических сооружений, включая намыв дамб эстакадным, зенитным, безэстакадным способами, может привести к геомеханическим нарушениям и естественным напряженно-деформированным состояниям, в результате чего возникает авария (разрыв плотины). Деление гидротехнического сооружения на четыре каскада, позволяет увидеть локальное наполнение разных участков хвостохранилищ (табл. 3).

Построив графики изменения площадей, можно отследить увеличение площади водного зеркала на всех каскадах (рис. 7).



**Рис. 5.** Высокая облачность на изображении Landsat /  
**Fig. 5.** High cloudiness in the Landsat image





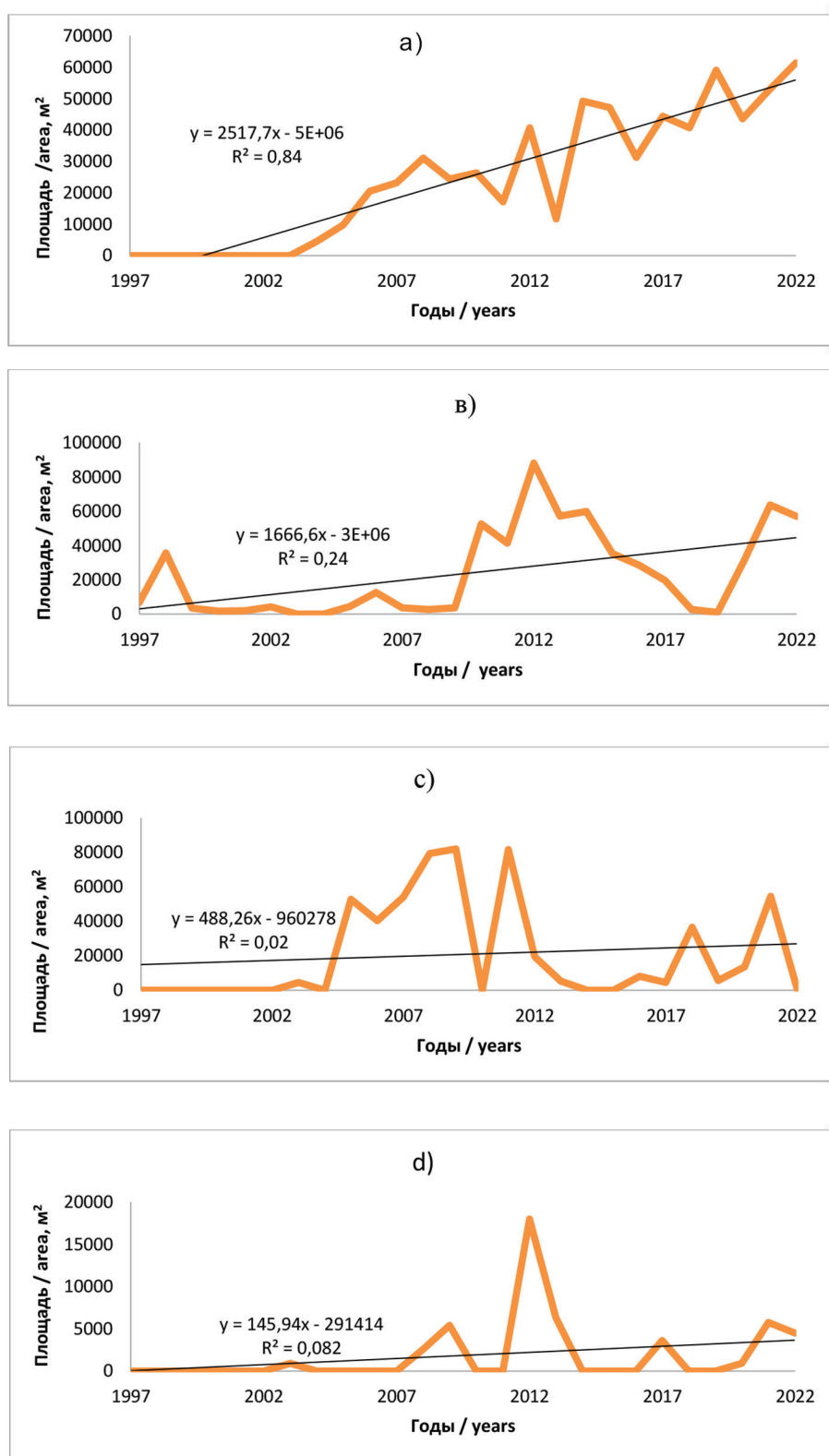
Наполняемость каскадов хвостохранилищ водой с 1997–2022 годы /  
Filling of cascades of tailings with water from 1997–2022

Годы / years	Площадь воды в каскадах / Water area in cascades (M <sup>2</sup> )				Сумма / Sum
	1	2	3	4	
1997	0	6754	0	0	6754
1998	0	35683	0	0	35683
1999	0	3377	0	0	3377
2000	0	1688	0	0	1688
2001	0	1801	0	0	1801
2002	0	4052	0	0	4052
2003	0	0	4503	901	5404
2004	4503	0	0	0	4503
2005	9681	4277	52793	0	66751
2006	20487	12495	40298	0	73280
2007	23189	3602	54145	0	80936
2008	31068	2589	79358	2589	115 604
2009	24427	3489	81947	5404	115 267
2010	26300	52568	0	0	78868
2011	17110	41424	81609	0	140 143
2012	40748	88027	19362	18010	166 147
2013	11708	57183	5178	6304	80373
2014	49191	59884	0	0	109 075
2015	47165	35233	0	0	82398
2016	31293	28591	8105	0	67989
2017	44350	19586	4503	3602	72041
2018	40748	2703	36471	0	79922
2019	59096	901	5516	0	65513
2020	43563	31068	13621	901	89153
2021	52793	63712	54369	5741	176 615
2022	61460	56958	901	4503	123 822
	– отсутствие воды / lack of water				
	– максимальное значение / maximum value				

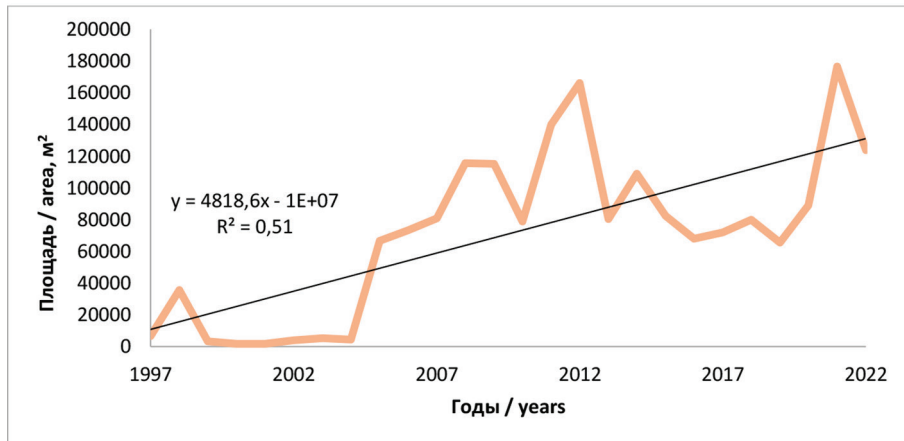
Из положительных линий тренда можно сделать вывод, что со временем хвостохранилища заполняются. Наглядно это видно, если просуммировать площади всех каскадов за разные годы (рис. 8).

Чаша хвостохранилища может наполняться водой не только посредством сброса пульпы с хвостами на пляж. Накопление водной массы происходит также вследствие дождевых осадков. Благодаря данным месячных осадков с ближайшей метеостанции

в с. Усугли, [12] можно сделать вывод, что роль осадков минимальная в виду их малой величины и в значительном наполнении хвостохранилища с 1997 по 2022 г. они не участвовали (рис. 9). Благодаря модели рельефа SRTM (радиолокационная топографическая миссия шаттла или с англ. Shuttle Radar Topography Mission), можно заметить, что основная доля осадков по водосборной площади «скатится» по пойме реки Дарасун вниз, минуя хвостохранилище (рис. 10).



**Рис. 7.** Графики изменения площадей водных зеркал каскадов:  
а) № 1; б) № 2; в) № 3; г) № 4 / **Fig. 7.** Graphs of changes in the areas of water mirrors of cascades: a) no. 1; б) no. 2; в) no. 3; г) no. 4



**Рис. 8.** График изменения площадей водных зеркал всех каскадов /  
**Fig. 8.** Graph of changes in the areas of water mirrors of all cascades

Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Усугли													
(по online данным и литературным источникам)													
год	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	за год
1997,00	0.3	2,00	3,00	3,00	34,00	46,00	40,00	49,00	9,00	5,00	2,00	3,00	197,00
1998,00	0.0	0.8	10,00	8,00	12,00	111,00	113,00	79,00	39,00	9,00	0.0	2,00	383,00
1999,00	2,00	0.5	4,00	4,00	16,00	18,00	78,00	76,00	23,00	7,00	6,00	8,00	244,00
2000,00	3,00	2,00	5,00	5,00	30,00	76,00	172,00	44,00	49,00	17,00	2,00	6,00	410,00
2001,00	7,00	0.0	11,00	8,00	30,00	10,00	135,00	65,00	47,00	11,00	1,00	2,00	328,00
2002,00	10,00	1,00	5,00	11,00	49,00	91,00	85,00	46,00	5,00	24,00	2,00	1,00	329,00
2003,00	2,00	2,00	0.8	15,00	0.3	11,00	94,00	135,00	45,00	34,00	9,00	12,00	359,00
2004,00	0.0	4,00	3,00	8,00	15,00	56,00	38,00	45,00	36,00	0.8	0.5	2,00	208,00
2005,00	0.0	0.5	3,00	14,00	50,00	72,00	109,00	25,00	49,00	2,00	7,00	8,00	338,00
2006,00	13,00	4,00	7,00	8,00	33,00	55,00	26,00	77,00	31,00	1,00	6,00	3,00	263,00
2007,00	0.7	3,00	7,00	6,00	34,00	58,00	66,00	91,00	7,00	6,00	2,00	1,00	281,00
2008,00	0.4	3,00	6,00	7,00	40,00	88,00	76,00	192,00	55,00	7,00	3,00	0.8	479,00
2009,00	1,00	6,00	2,00	5,00	33,00	45,00	53,00	57,00	68,00	4,00	5,00	15,00	293,00
2010,00	5,00	6,00	4,00	5,00	56,00	44,00	74,00	65,00	51,00	10,00	19,00	15,00	354,00
2011,00	0.4	0.7	1,00	7,00	5,00	26,00	170,00	41,00	24,00	3,00	3,00	2,00	281,00
2012,00	6,00	1,00	3,00	15,00	33,00	137,00	111,00	83,00	53,00	5,00	20,00	4,00	470,00
2013,00	2,00	2,00	1,00	4,00	34,00	149,00	71,00	127,00	54,00	0.9	3,00	5,00	452,00
2014,00	1,00	3,00	0.2	5,00	66,00	89,00	50,00	70,00	58,00	26,00	4,00	2,00	374,00
2015,00	6,00	0.0	0.3	0.9	21,00	71,00	51,00	152,00	16,00	12,00	4,00	3,00	336,00
2016,00	1,00	6,00	2,00	24,00	43,00	32,00	92,00	42,00	104,00	6,00	7,00	6,00	364,00
2017,00	0.0	0.9	0.0	7,00	38,00	26,00	75,00	176,00	60,00	0.9	1,00	5,00	390,00
2018,00	2,00	0.0	5,00	0.3	22,00	73,00	101,00	33,00	85,00	3,00	3,00	13,00	341,00
2019,00	0.0	0.0	6,00	5,00	32,00	57,00	60,00	51,00	50,00	9,00	2,00	1,00	273,00
2020,00	0.0	3,00	2,00	8,00	26,00	112,00	149,00	161,00	31,00	21,00	1,00	0.0	513,00
2021,00	5,00	13,00	3,00	11,00	21,00	84,00	138,00	180,00	127,00	4,00	6,00	1,00	594,00
2022,00	4,00	3,00	5,00	4,00	12,00	55,00	213,00	42,00	78,00	11,00	4,00	0.3	430,00

**Рис. 9.** Суммы выпавших осадков в с. Усугли / **Fig. 9.** The amount of precipitation in the village of Usugli

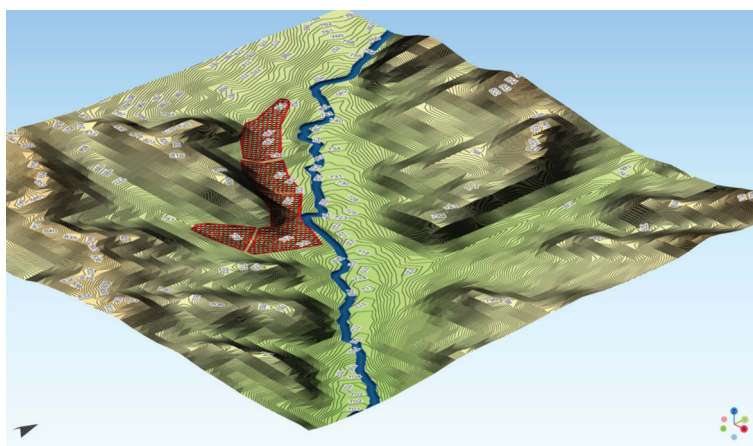


Рис. 10. Высотная модель SRTM / Fig. 10. Altitude Model SRTM

**Выводы.** Произведена пространственно-временная оценка площадей водного зеркала чаш каскада хвостохранилищ Дарасунского рудника с построением графиков изменения площадей водной поверхности за 25-летний период (с 1997 по 2022 г.). Полученные данные свидетельствуют об активном использовании данных сооружений. Исключая осадки, выпадающие в исследуемый временной промежуток, можно сделать вывод, что производится выброс пульпы на пляж хвостохранилищ. На графиках наблюдается хаотичное использование каскадов хвостохранилищ. При этом заполнению каскады подвергаются последовательно в сторону верхнего бьефа, что соответствует технологии укладки хвостов. Космический мониторинг изменения площадей водных зеркал каскадов хвостохранилищ и шламоохранилищ Дарасунского рудника, позволяет не просто констатировать ситуацию, но и управлять процессом, своевременно спрогнозировав один из следующих вариантов загрязнения: 1) литосферное загряз-

нение за счёт миграции загрязняющих веществ при утечках пульпы в аварийных ситуациях (разрыв тела дамбы, повреждение трубопроводов оборотной воды, нарушение герметичности водосливных колодцев); 2) гидросферное загрязнение – аварийное поступление промышленных вод и пульпы в поверхностные водоемы, сброс сточных вод, смыв атмосферными осадками загрязняющих веществ с откосов дамб и плотин, миграция загрязняющих веществ в подземные водоносные горизонты; 3) аэровоздушное загрязнение – пыление сухих откосов и поверхностей хвостохранилищ, насыпей, что является типичным для Дарасунского рудника, в связи с периодической остановкой горного предприятия на длительный период; 4) биологическое загрязнение проявляется в накоплении макро- и микрокомпонентов, появляются новые виды болезней и гибель растительности и животного мира, особенно учитывая большое содержание мышьяка и меди в техногенных отходах, многократно превышающие ПДК.

#### Список литературы

1. Березин И. А., Михаханов М. М., Мункуев А. Н. Эколого-гигиеническая оценка горнорудной территории пгт. Вершино-Дарасунский // Медицина завтрашнего дня: материалы XIX Межрегион. науч.-практ. конф. студ. и молодых ученых (Чита, 19–22 мая 2020 г.). Чита: Чит. гос. мед. академия, 2020. 316 с.
2. Бортникова С. Б., Юркевич Н. В., Саева О. П., Корнеева Т. В. Гидрохимические аномалии в районе складирования сульфидных отходов золотодобычи (пос. Вершино-Дарасунский, Забайкальский край) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: сб. материалов четвертой всерос. науч. конф. с междунар. участием (Улан-Удэ, 17–20 августа 2020 г.) / Геологический институт СО РАН. Улан-Удэ: Бурят. науч. центр СО РАН, 2020. С. 282–285. DOI: 10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-282-285. EDN CYOZZD.
3. Курганович К. А., Шаликовский А. В., Босов М. А., Кочев Д. В. Применение алгоритмов искусственного интеллекта для контроля паводкоопасных территорий // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 3. С. 6–24.
4. Курганович К. А., Кочев Д. В., Босов М. А. Использование гибридного метода совместного анализа данных спутникового зондирования Landsat и беспилотных летательных аппаратов для реконструк-

ции уровней воды и объемов водной массы в водоемах (на примере оз. Арахлей Забайкальского края) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28, № 1. С. 368–382.

5. Курганович К. А., Носкова Е. В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 6. С. 16–24. EDN UMMZLJ.

6. Курганович К. А. Сравнение алгоритмов дешифрирования водных поверхностей по индексам NDWI и MNDWI на примере степных озер Восточного Забайкалья // Водные ресурсы и водопользование: сб. трудов (Чита, 1 июля 2015 г.). Чита: ЗабГУ, 2015. С. 15–23. EDN VHKMLD.

7. Лотош В. Е. Экология природопользования. Екатеринбург: Урал. гос. ун-т путей сообщения, 2007. 554 с.

8. Степанова В. Б. Результаты геоэкологического обследования рудника Вершино-Дарасунский // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVII Междунар. симпозиума им. акад. М. А. Усова студ. и молодых учёных, посвящённого 150-летию со дня рождения акад. В. А. Обручева и 130-летию акад. М. А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы, (Томск, 1–6 апреля 2013 г.) / Национальный исследовательский Томский политехнический университет: в 2 т. Томск: Нац. исследовательский Томск. политехн. ун-т, 2013. Т. 2. С. 619–621. EDN STAXJF.

9. Шестернёв Д. В. Физическое и химическое выветривание массивов горных пород в криолитозоне. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 3. С. 350–360.

10. Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К., Черкасов В. Г. Стратегии рационального и комплексного использования минерального сырья на основе наилучших доступных технологий и оценки жизненного цикла отходов горного производства // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 4. С. 32–44.

11. Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Черкасов В. Г. Интегральная промышленная система утилизации техногенных отходов горных предприятий, территориально объединённых // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 6. С. 40–49.

12. Погода и климат. Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Усугли. URL: [http://www.pogodaiklimat.ru/history/30764\\_2.htm](http://www.pogodaiklimat.ru/history/30764_2.htm) (дата обращения: 14.04.2023). Текст: электронный.

13. McFeeters S. K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. 1996. No. 17. P. 1425–1432.

14. Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N. Leaching of chalcocopyrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods // Hydrometallurgy. 2018. No. 181. P. 215–220.

15. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. No. 27. P. 3025–3033.

## References

1. Berezin I. A., Mikhakhanov M. M., Munkuyev A. N. Ecological and hygienic assessment of the mining territory of the village. Verzhino-Darasunsky. Medicine of tomorrow. Materials of the XIX interregional scientific and practical conference of students and young scientists. Chita, May 19–22, 2020. Chita: Chita State Medical Academy, 2020. (In Rus.)

2. Yurkevich N. V., Bortnikova S. B., Saeva O. P., Korneeva T. V. Hydrochemical anomalies in the area of storage of sulfide gold mining waste (Verzhino-Darasunsky settlement, Transbaikal State University). Geological evolution of the water interaction with rocks: Collected materials of the Fourth All-Russian Scientific Conference with international participation. Ulan-Ude, August 17–20, 2020. Geological Institute SB RAS. Ulan-Ude: Buryat Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2020. (In Rus.)

3. Kurganovich K. A., Shalikhovskiy A. V., Bosov M. A., Kochev D. V. Application of artificial intelligence algorithms for flood-prone territories control. Water management of Russia: problems, technologies, management, no. 3, pp. 6–24, 2021. (In Rus.)

4. Kurganovich K. A., Kochev D. V., Bosov M. A. The use of a hybrid method of joint analysis of Landsat satellite sensing data and unmanned aerial vehicles for the reconstruction of water levels and volumes of water mass in reservoirs (on the example of Lake. Peanuts of the Transbaikal Territory). InterCarto. InterGIS, vol. 28, no. 1, pp. 368–382, 2022. (In Rus.)

5. Kurganovich K. A., Noskova E. V. The use of water indices to assess changes in the water mirror areas of steppe soda lakes in the south-east of Transbaikalia, according to remote sensing data. Transbaikal State University Journal, no. 6, pp. 16–24, 2015. (In Rus.)

6. Kurganovich K. A. Comparison of algorithms for decoding water surfaces by NDWI and MNDWI indices on the example of steppe lakes of Eastern Transbaikalia. Water resources and water use. Collected works, Chita, July 1, 2015. Chita: Transbaikal State University, 2015. (In Rus.)

7. Lotosh V. E. Ecology of nature management. Yekaterinburg: Ural State University of Railways, 2007. (In Rus.)

8. Stepanova V. B. Results of the geoecological survey of the Verzhino-Darasunsky mine. Problems of geology and subsoil development. Proceedings of the XVII International Symposium named after Academician

M. A. Usov of students and young scientists dedicated to the 150th anniversary of the birth of Academician V. A. Obruchev and the 130th anniversary of Academician M. A. Usov, founders Siberian Mining and Geological School. Tomsk, April 01–06, 2013. National Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2013. (In Rus.).

9. Shesternev D. V. Physical and chemical weathering of rock massifs in the cryolithozone. Mining information and analytical bulletin, no. 3, pp. 350–360, 2017. (In Rus.).

10. Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K., Cherkasov V. G. Strategies of rational and integrated use of mineral raw materials based on the best available technologies and assessment of the life cycle of mining waste. Bulletin of the Transbaikal State University, vol. 27, no. 4, pp. 32–44, 2021. (In Rus.).

11. Shumilova L. V., Khatkova A. N., Cherkasov V. G. Integral industrial system of utilization of technogenic waste of mining enterprises, territorially united. Bulletin of the Transbaikal State University, vol. 27, no. 6, pp. 40–49, 2021. (In Rus.).

12. Weather and climate. Monthly and annual amounts of precipitation in Usugli. Web. 14.04.2023. [http://www.pogodaiklimat.ru/history/30764\\_2.htm](http://www.pogodaiklimat.ru/history/30764_2.htm). (In Rus.).

13. McFeeters S. K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, no. 17, pp. 1425–1432, 1996. (In Eng.).

14. Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N. Leaching of chalcopyrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods. Hydrometallurgy, no. 181, pp. 215–220, 2018. (In Eng.).

15. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, no. 27, pp. 3025–3033, 2006. (In Eng.).

### **Информация об авторах**

*Кочев Денис Владимирович*, аспирант, ассистент кафедры водного хозяйства, экологической и промышленной безопасности, заведующий лабораториями, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; [denis.ko4ev@yandex.ru](mailto:denis.ko4ev@yandex.ru). Область научных интересов: геоэкология, дистанционное зондирование Земли, геоинформационные системы, беспилотные летательные аппараты, радиолокация, машинное обучение, нейронные сети.

*Шумилова Лидия Владимировна*, д-р техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, Читинский филиал Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН (ЧФ ИГД СО РАН), г. Чита, Россия; [shumilovalv@mail.ru](mailto:shumilovalv@mail.ru). Область научных интересов: геоэкология, обогащение полезных ископаемых, физико-химическая геотехнология, инновационные технологии, экоинженерия.

### **Information about the author**

*Kochev Denis V.*, postgraduate, assistant assistant of the Department of Water Management, Environmental and Industrial Safety, head of laboratories, Transbaikal State University, Chita, Russia; [denis.ko4ev@yandex.ru](mailto:denis.ko4ev@yandex.ru). Research interests: geoecology, remote sensing of the Earth, geoinformation systems, unmanned aerial vehicles, radar, machine learning, neural networks.

*Shumilova Lidiya V.*, doctor of technical sciences, associate professor, senior researcher, Chita branch of the Institute of Mining named after N. A. Chinakal of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (CB IM SB RAS), Chita, Russia, [shumilovalv@mail.ru](mailto:shumilovalv@mail.ru). Research interests: geoecology, mineral processing, physical and chemical geotechnology, innovative technologies, eco-engineering.

### **Вклад авторов в статью**

Д. В. Кочев – оценка экологической ситуации на хвостохранилище Дарасунского рудника; выбор оптимального метода дешифрирования водной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли; сбор и формирование архива данных дистанционного зондирования Земли; вычисление спектральных индексов NDWI MNDWI и ретроспективный анализ изменения площади водной поверхности хвостового хозяйства Дарасунского рудника; подбор библиографии, написание текста.

Л. В. Шумилова – разработка идеи исследования; анализ разработанности темы; анализ полученных результатов; формулировка выводов; прогноз вариантов аварийных ситуаций литосферного, гидросферного, аэровоздушного, биологического загрязнений; подбор библиографии, написание текста.

### **The authors' contributions to the article**

D. V. Kochev – assessment of the ecological situation at the Darasunsky tailings mine; selection of the optimal method of water surface interpretation using remote sensing data; collection and formation of the remote sensing data archive; calculation of NDWI MNDWI spectral indices and retrospective analysis of water surface area changes at the Darasunsky tailings mine; selection of bibliography, text writing.

L. V. Shumilova – development of research idea; analysis of topic development; analysis of obtained results; formulation of conclusions; forecast of lithospheric, hydrospheric, air and biological pollution accidental situations; selection of bibliography, text writing.

**Для цитирования**

Кочев Д. В., Шумилова Л. В. Применение спектральных водных индексов на хвостовом хозяйстве Дарасунского рудника по данным дистанционного зондирования Земли программы Landsat // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 2. С. 45–60. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-2-45-60.

**For citation**

Kochev D. V., Shumilova L. V. Application of spectral water indices on the tailings of the Darasunsky mine according to the remote sensing data of the Landsat program // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 2. P. 45–60. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-2-45-60.