

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Экология

УДК 504.054, 528.88

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-248-258>

Оригинальная статья

Применение методов дистанционного зондирования для оценки экологической ситуации в бассейне верхнего течения реки Лена

Г. Н. Саввинов^{✉1}, В. С. Макаров^{1,2}

¹Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск, Российская Федерация

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉savvinov_gn@mail.ru

Аннотация

В статье затронута проблема загрязнения р. Лена золотодобывающими предприятиями, функционирующими в ее верхнем течении. Промышленная разработка рудных и россыпных месторождений золота активно ведется на территориях пяти регионов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, наиболее масштабное освоение осуществляется в Иркутской области, Бурятии и Якутии. Дальнейшая интенсификация деятельности объектов золотодобывающей промышленности приведет к значительным негативным воздействиям на экосистемы бассейна верхнего течения р. Лена. В связи с этим рассмотрены возможности применения спутниковых данных Sentinel-2 для оценки экологической ситуации в речных системах Якутии. В работе использованы наиболее распространенные водные индексы NDTI, AMWI и Narma. Объектом применения данных индексов был выбран район устья р. Витим, в бассейне которого сосредоточено наибольшее количество действующих лицензионных участков по золотодобыче. Выделены тестовые участки на реках Витим и Лена, а также на оз. Охнинское в качестве контроля. Водные индексы проанализированы в программном пакете ArcGIS, статистическая обработка данных проведена в программе MS Excel. Выявлено, что для оценки мутности поверхностных вод в районе устья р. Витим наилучшие результаты дает использование индекса AMWI. Показаны пространственные закономерности и проанализирована сезонная динамика мутности изучаемых водных объектов. Предложенная методика с использованием индекса AMWI может применяться для оперативной оценки состояния водных объектов Якутии в условиях их активного техногенного загрязнения, с целью своевременного принятия превентивных природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: река Лена, экосистемы, золотодобывающая промышленность, техногенное воздействие, загрязнение природных вод, метод дистанционного зондирования

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ «Биота и абиотические компоненты экосистем Северо-Востока России и рациональное освоение природных ресурсов криолитозоны в условиях изменения климата и техногенного воздействия» (№ FSRG-2013-0011).

Для цитирования: Саввинов Г.Н., Макаров В.С. Применение методов дистанционного зондирования для оценки экологической ситуации в бассейне верхнего течения реки Лена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):248–258. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-248-258>

Application of remote sensing methods to assess the environmental situation in the upper Lena River basin

Grigory N. Savvinov^{✉,1}, Victor S. Makarov^{1,2}

¹Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

²Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

[✉]savvinov_gn@mail.ru

Abstract

This article addresses the problem of pollution in the Lena River caused by gold mining enterprises operating in its upper regions. It highlights the ongoing industrial exploitation of ore and placer gold deposits in five regions within the Siberian and Far Eastern federal districts. The most large-scale development is carried out in the Irkutsk region, Buryatia, and Yakutia. Further intensification of gold mining activities will result in significant negative impacts on the ecosystems of the upper reaches of the Lena River basin. In this context, the potential applications of Sentinel-2 satellite data for assessing the ecological conditions of river systems in Yakutia are being explored. The most common water indices, NDTI, AMWI, and Harma, were used in this study. The indices were applied to analyze the area of the Vitim River mouth, which contains the highest concentration of active gold mining license areas in the basin. Test sites were allocated on the Vitim and Lena rivers, as well as on Lake Okhninskoye for control purposes. Water indices were analyzed using the ArcGIS software package, and statistical data processing was conducted in the MS Excel program. It is revealed that the best results for estimating surface water turbidity in the area of the Vitim River mouth are obtained using the AMWI index. Spatial regularities are demonstrated, and the seasonal dynamics of turbidity in the studied water bodies are analyzed. The proposed methodology using the AMWI index can be applied for operational assessment of the state of water bodies in Yakutia under conditions of active anthropogenic pollution. This can facilitate timely implementation of preventive environmental protection measures.

Keywords: Lena River, ecosystems, gold mining industry, technogenic impact, natural water pollution, remote sensing method

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation “Biota and abiotic components of ecosystems in the North-East of Russia and the rational development of natural resources of the permafrost zone under conditions of climate change and technogenic impact” (No. FSRG-2013-0011).

For citation: Savvinov G.N., Makarov V.S. Application of remote sensing methods to assess the environmental situation in the upper Lena River basin. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):248–258. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-248-258>

Введение

Одним из наиболее значимых техногенных факторов воздействия на экосистемы р. Лена является масштабная разработка месторождений золота в бассейне ее верхнего течения, которая сопровождается рассеиванием больших масс загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду.

Промышленное освоение бассейна верхней Лены (реки Бодайбо, Витим, Малый Патом, Хомолхо и др.) началось с открытия приисков иркутских купцов Трапезникова, Катывшевцева, Базилевского, Баснина и др., где с середины XIX в. стали разрабатывать богатейшие россыпные месторождения золота [1].

В настоящее время бассейн р. Лена охватывает территории, относящиеся к семи субъектам Си-

бирского (Красноярский край, Иркутская область) и Дальневосточного (Забайкальский край, Республика Бурятия, Республика Саха (Якутия), Амурская область и Хабаровский край) федеральных округов (рис. 1). Из них в бассейне верхнего течения р. Лена золотобыча рудных и россыпных месторождений активно ведется в пяти регионах, наиболее масштабное освоение осуществляется в Иркутской области, Бурятии и Якутии (табл. 1). Среди указанных субъектов Иркутская область относится к числу ведущих золотодобывающих регионов Российской Федерации.

В Иркутской области из всего количества разведанного золота на долю рудного приходится примерно 85 %, россыпного — 15 %. Его балансовые запасы сосредоточены почти на 300 месторождениях, а прогнозные ресурсы оценены

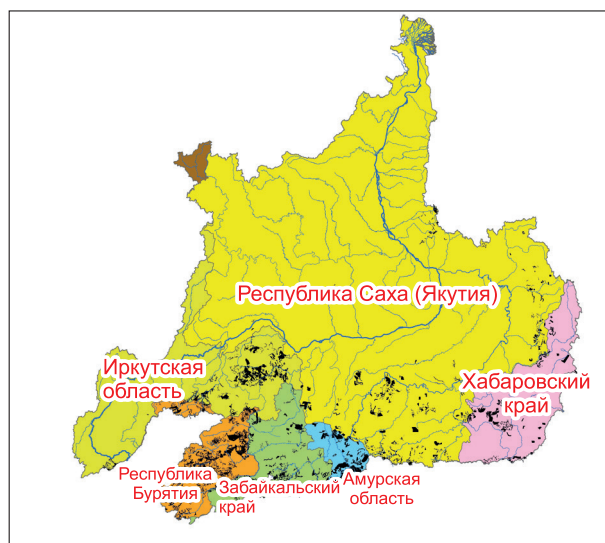


Рис. 1. Распределение лицензионных участков золотодобывающих предприятий в субъектах РФ, расположенных в бассейне верхнего течения р. Лена

Fig.1. Distribution of license areas for gold mining companies in the regions of the Russian Federation, located in the upper reaches of the Lena River basin

более чем для 100 объектов в Бодайбинском, Мамско-Чуйском, Нижнеудинском, Ольхонском и Иркутском административных районах.

Золотодобывающая промышленность в регионе представлена такими предприятиями, как

Таблица 1

Количество и общая площадь лицензионных участков золотодобывающих предприятий по регионам СФО и ДВФО, расположенных в бассейне верхнего течения р. Лена

Table 1

Number and total area of licensed gold mining enterprises in the regions of SFD and FEFD, located in the upper reaches of the Lena River basin

Регион	Количество объектов с лицензией недропользователя	Общая площадь лицензионных участков в регионе, км ²
Хабаровский край	120	7696,422
Амурская область	105	10208,3
Забайкальский край	156	11417,9
Иркутская область	489	13933,98
Республика Саха (Якутия)	612	15504,07
Республика Бурятия	461	25027,19

АО «ЗДК «Лензолото» и АО «Полюс Вернинское» (входят в группу ПАО «Полюс»), ПАО «Высочайший», АО «Артель старателей «Витим», ООО «Друза». По итогам 2023 г. добыча золота в Иркутской области составила 22 364,5 кг драгметалла, из которых 14 429 кг рудного и 7 935,5 кг россыпного золота.

На территории области выделяют три отдельных золотоносных района: Лено-Витимский, Восточно-Саянский и Предбайкальский. Из них Лено-Витимский золотоносный район по своей площади и запасам занимает первое место. Здесь сосредоточено 95 % россыпного и примерно столько же рудного золота Иркутской области. Расположен он в центральной части Патомского нагорья, в бассейнах Витима, Чары и Олекмы — притоков Лены. Охватывает территорию площадью около 50 тыс. км².

Материалы и методы

Одним из приоритетных направлений современных природоохранных мероприятий является совершенствование действующих и развитие новых принципов и методов экологического мониторинга за состоянием водных объектов при различных видах антропогенного воздействия. Важный шаг на пути к эффективному решению этой задачи — использование методов дистанционного зондирования. Оценка мутности воды дистанционными методами основано на использовании способности взвешенных веществ усиливать рассеивание света в воде. Водоёмы, содержащие большое количество взвешенных частиц, сильнее отражают световую волну во всем видимом диапазоне, чем чистая вода. В данной работе были использованы наиболее распространенные водные индексы [2–4]:

1. Индекс NDTI= (Red – Green) / (Red+ Green).
2. Индекс AMWI= (Red – Blue) / (Red+ Blue).
3. Индекс Hama= Blue / (Red+ Green+ Blue),

где Red, Green и Blue – коэффициенты спектральной яркости в красном, зеленом и синем каналах соответственно.

Материалами для исследования послужили спутниковые снимки Sentinel-2 – семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства, созданное в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды и безопасности «Коперник». Всего для анализа было выбрано четыре снимка с минимальной (нулевой) облачностью.

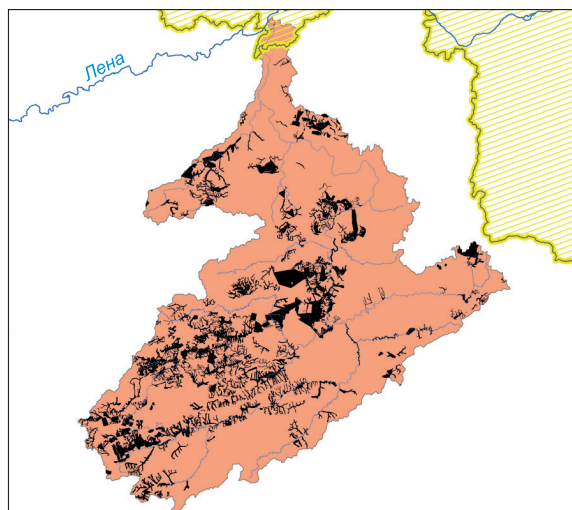


Рис. 2. Расположение лицензионных участков золото-добывающих предприятий в бассейне р. Витим

Fig. 2. Location of gold mining license areas in the Vitim River basin

Объектом применения данных индексов был выбран район устья р. Витим. Выбор района обусловлен тем, что в бассейне реки расположены одни из богатейших месторождений золота, занимающие первое место в России не только по запасам, но и по своей площади. Как было выше отмечено, золотодобыча в бассейне Витима имеет долгую историю, начиная с XIX в., когда первые золотоискатели начали осваивать эти богатые драгоценным металлом земли. ГИС-анализ показал, что сегодня в бассейне Витима сосредоточено наибольшее количество действующих лицензионных участков по сравнению с другими притоками р. Лена (рис. 2).

Устьевая часть р. Витим представляет с собой замыкающий створ водотока, по которому можно получить интегральное представление о миграции и аккумуляции потоков веществ в пределах всего бассейна.

Чтобы узнать, в каком качественном состоянии воды рек Витим и Лена достигли своих устьев, мы выделили отдельные тестовые участки на этих реках (2 и 3), отстоящие примерно в 3 км выше от устьевых частей (рис. 3). Еще один тестовый участок (1) находился на оз. Охнинское, которое расположено в 20 км от устья Витима. В районе озера отсутствует воздействие промышленных и селитебных объектов, поэтому оно было выбрано в качестве контроля. В программном пакете ArcGIS растры водных индек-

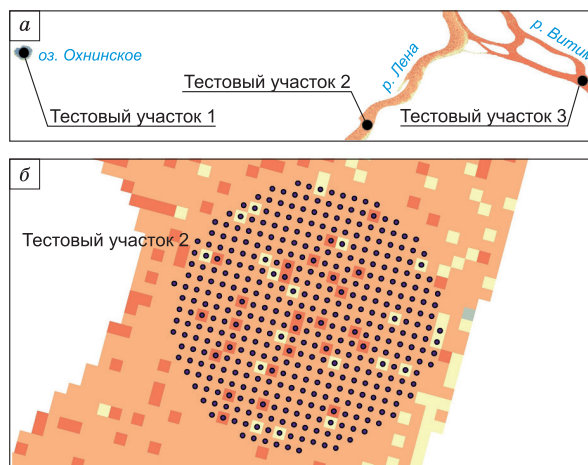


Рис. 3. Тестовые участки в районе устья р. Витим (а) и крупным планом тестовый участок 2 с точечным шейп-файлом (б)

Fig. 3. Test sites in the area of the Vitim River mouth (а) and a close-up of test site 2 with a point shapefile (б)

сов были вырезаны по контуру тестовых участков, в результате были получены новые матрицы растров, состоящие из 420 пикселей.

После конвертации растров в объекты шейп-файла атрибутивные таблицы были экспортированы в текстовый формат и подвергнуты процедуре однофакторного дисперсионного анализа (с уровнем значимости 0,05) в программе MS Excel. Для проведения дисперсионного анализа необходимо сформулировать и проверить нулевую гипотезу, а также рассчитать ее вероятность. В нашем случае рассматриваются две нулевые гипотезы. Первая гипотеза выдвигает предположение, что средние значения пикселей (водных индексов) в трех тестируемых участках поверхностных вод равны между собой. Вторая гипотеза выдвигает предположение, что средние значения пикселей (водных индексов) в одном из поверхностных вод не имеют сезонной динамики.

Результаты и обсуждение

Интенсификация золотодобывающей промышленности в Иркутской области сопровождается масштабным негативным воздействием на экосистемы бассейна верхнего течения р. Лена, расположенные не только в Иркутской области, но и на сопредельной территории Республики Саха (Якутия).

Как известно, весь спектр схем и способов промышленной добычи золота сопровождается

мощным негативным воздействием на окружающую среду: загрязнения не только атмосферы при буровзрывных работах на карьерах, но и водных и наземных экосистем при обогащении золотосодержащих песков и горных пород.

Во-первых, изменения пойм и русел рек, часто случающиеся в ходе промышленных разработок, несут колоссальные разрушительные последствия для аллювиальных ландшафтных комплексов. Добыча россыпного золота сегодня приводит к существенной деградации ландшафтов на достаточно больших площадях и загрязнению рек на многие километры вниз по течению. Хвосты флотации руд вызывают водную и ветровую эрозию, они подвержены пылению. Запыленность воздуха может превышать санитарные нормы на расстоянии 10 км и более от источника пыления, а при оседании пыли на почву и водоемы образуются сверхнормативные концентрации токсичных элементов [1, 5, 6].

Во-вторых, промышленное освоение золотосодержащих месторождений на верхней Лене имеет более чем 150-летнюю историю, в течение которой использовались самые различные способы извлечения золота. Наиболее опасен для окружающей среды использовавшийся в течение длительного времени амальгамный способ извлечения золота с использованием ртути. По некоторым расчетам, долины многих малых рек и их притоков районов длительной золотодобычи к настоящему времени насыщены техногенными отвалами, содержащими те или иные количества ртути, которая выводится на поверхность и вовлекается в экзогенные процессы. В результате загрязнение ртутью встречается в поверхностных и подземных водах, донных отложениях, почвах и растительности [7, 8].

В-третьих, техногенное воздействие предприятий, применяющих технологию кучного выщелачивания, на объекты окружающей среды носит комплексный характер, связанный с загрязнением атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, отчуждением и разрушением природных биоценозов прилегающих территорий [9]. Основная проблема состоит в использовании при растворении благородных металлов растворителя – цианида, который наряду с высокой избирательностью к золоту и серебру является высокотоксичным ядовитым веществом [10]. Загрязнение атмосферного воздуха летучим цианистым водородом, образующимся в результате разложения цианистых солей, а также прямые

утечки продуктивных цианистых растворов, приводящие к загрязнению почв, подземных и поверхностных вод, также требуют строгого соблюдения техники безопасности и разработки специальных мероприятий защиты окружающей среды [11].

Таким образом, разработка россыпных месторождений золота открытым способом – это самый разрушительный антропогенный фактор для окружающей природной среды.

Отмечено, что разработка россыпных месторождений золота является источником поступления избыточного количества минеральных взвесей в водотоки. Обобщение имеющихся данных показывает, что если в контрольных реках (не затронутых отработкой) общее содержание взвеси 100–200 мг/л (мутность воды), то в реках со средней антропогенной нагрузкой эти показатели увеличиваются соответственно до 250 мг/л, а в интенсивно эксплуатируемых реках иногда превышают 500 мг/л. Большая часть продуктов эрозии антропогенного происхождения, особенно мелкие фракции, уносится потоком во взвешенном состоянии в низовья рек, часть же аккумулируется на дне и в толще грунта в верховьях [7].

Недавние исследования показали, что для оценки мутности воды методами дистанционного зондирования Земли можно использовать характеристики ее отражающей способности даже в пределах одного спектрального канала, однако наилучшие результаты достигаются при использовании водных индексов, рассчитываемых при помощи двух и более спектральных каналов.

Индекс NDTI (нормализованный разностный индекс мутности воды) был разработан в 2006 г. для оценки мутности водоемов в Сенегале [2]. Авторы индекса отмечают специфичность радиометрического отклика чистой воды. В зеленой области спектра чистая вода имеет слабое отражение (менее 10 %), которое становится очень малым в красной и почти нулевым в ближнем инфракрасном диапазоне. Когда водоемы становятся грязными и нагружаются взвешенными отложениями, увеличение мутности и связанная с ней радиометрическая реакция заставляют пруд вести себя как оголенная почва, при этом значения красных радиометрических откликов становятся намного больше, чем зеленых. Поэтому увеличение мутности воды приводит к повышению отражения в красной области и увеличению индекса NDTI. В работах [12–14] показано наличие тесной корреляционной связи между индек-

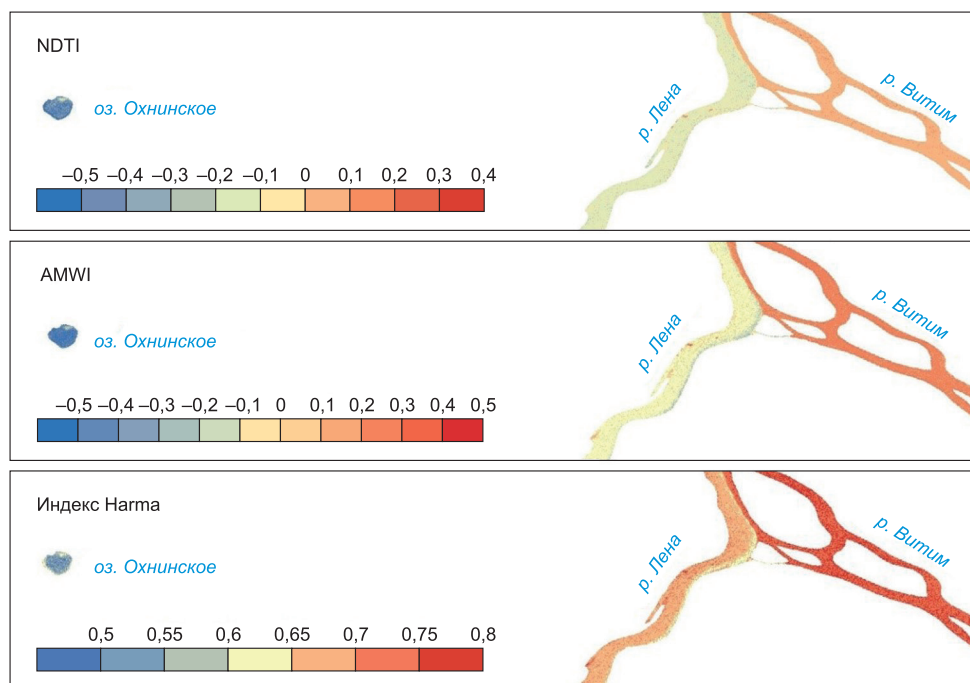


Рис. 4. Распределение NDTI, AMWI и индекса Harma поверхностных вод в районе устья р. Витим по данным спутникового снимка Sentinel-2 за 16 июля 2023 г.

Fig. 4. Distribution of NDTI, AMWI, and Harma index of surface water in the area of Vitim River mouth based on Sentinel-2 satellite image data for July 16, 2023

сом NDTI и фактически измеренными значениями содержания взвешенных веществ в воде, при этом отмечается наличие степенной зависимости между характеристикой мутности и индексом NDTI.

Индекс AMWI (Acid Mine Water Index) впервые был представлен в работе [3] для выявления спектральных особенностей поверхностных водотоков, загрязненных шахтными излиями. Авторами было установлено, что основной особенностью речной воды, загрязненной кислыми шахтными водами, является резкий рост коэффициента спектральной яркости от синего диапазона к красному.

Индекс Harma – это показатель мутности поверхностных вод, который был разработан для исследования озер Финляндии и прибрежных вод Балтийского моря. Он был предложен в работе финских ученых Харма и Вепсалайнен в 2001 г. [4]. Индекс Harma имеет сильную корреляцию с натурными данными мутности воды. В результате сравнительных исследований между индексом Harma и мутностью воды были установлены статистические связи, которые показали, что коэффициент корреляции между ними может достигать 0,95 в отдельные дни [15, 16].

Результат использования вышепредставленных индексов показан на примере слияния двух рек (Лены и Витима) с различной степенью мутности (рис. 4). На всех индексах р. Витим имеет более высокую мутность, что видно по более интенсивному красному цвету. В то же время на р. Лена отмечена низкая степень мутности, что коррелируется с ее более светлой цветовой гаммой. Также на рисунке показано контрольное озеро с наименьшим значением индекса мутности, отличающегося темно-синим цветом. Наименьшая мутность воды в озере может быть обусловлена несколькими факторами, такими как отсутствие крупных источников загрязнения, олиготрофность озера и наличие растительности, которая способствует очистке воды. Поэтому оз. Охнинское, расположенное в 20 км от устья Витим, можно использовать в качестве контроля, где нет воздействия промышленных и селитебных объектов.

Чтобы определить, какой из индексов лучше всего отражает мутность воды, был проведен однофакторный дисперсионный анализ (табл. 2–4). Согласно нулевой гипотезе, статистически значимых различий мутности между тремя поверхностными водами (оз. Охнинское, реки Витим и Лена) не существует. Однако, для всех представ-

Таблица 2

**Однофакторный дисперсионный анализ
индекса NDTI на тестовых участках
района устья р. Витим за 16 июля 2023 г.**

Table 2

**One-factor analysis of variance
for the NDTI index at the test sites
in the Vitim River estuary area on July 16, 2023**

Источник вариации	Между группами	Внутри групп
SS	56,09	3,440
df	2	1257
MS	28,0458	0,0027
F	10247,2186	
P-Значение	0	
F критическое	3,002883179	

Таблица 4

**Однофакторный дисперсионный анализ
индекса Harma на тестовых участках
района устья р. Витим за 16 июля 2023 г.**

Table 4

**One-factor analysis of variance
for the Harma index at test sites
in the Vitim River estuary area on July 16, 2023**

Источник вариации	Между группами	Внутри групп
SS	10,93	0,474
df	2	1257
MS	5,4674	0,0003
F	14469,33	
P-Значение	0	
F критическое	3,002883179	

ленных индексов P-значение оказалось значительно ниже $\alpha = 0,05$, что указывает на наличие значимой разницы между средними значениями индексов исследуемых водных объектов. При этом более высокая величина F-критерия была отмечена при использовании индекса AMWI.

Все три индекса показали статистически значимые колебания мутности в реках Витим и Лена в течение одного летнего сезона. Это визуально хорошо прослеживается и по спутниковым снимкам, особенно сильный контраст индексов наблюдался в р. Лена. Что касается мутности оз. Охнинское, то его цветовой оттенок практически не менялся во времени, поэтому визуально сложно оценить временную динамику его мутности.

Дисперсный анализ показал статистически значимые колебания мутности озера при использо-

Таблица 3

**Однофакторный дисперсионный
анализ индекса AMWI на тестовых участках
района устья р. Витим за 16 июля 2023 г.**

Table 3

**One-factor analysis of variance
for the AMWI index at test sites
in the Vitim River estuary area on July 16, 2023**

Источник вариации	Между группами	Внутри групп
SS	100,6	2,324
df	2	1257
MS	50,3210	0,0018
F	27214,6386	
P-Значение	0	
F критическое	3,002883179	

вании индексов AMWI и NDTI, хотя значения F-критерия были относительно низкими. В отличие от предыдущих индексов, индекс Harma определил оз. Охнинское как водоем без сезонных колебаний мутности (P-значение $>0,05$; F-критерий $<$ критического F-критерия). Вероятно, это связано с тем, что индекс Harma менее чувствителен к небольшим изменениям мутности в чистой воде.

Таким образом для оценки мутности поверхностных вод в районе устья р. Витим наилучшие результаты выявлены при использовании индекса AMWI. Следует отметить, что этот индекс первоначально использовался для оценки степени загрязнения кислыми водами угольных месторождений, однако оказался наиболее информативным и для анализа мутности воды в районе деятельности золотодобывающих предприятий.

Пространственное распределение индекса AMWI в разные даты съемок показано на рис. 5. Для визуализации сезонной динамики были построены диаграммы размаха AMWI в тестовых участках – графики, использующиеся в описательной статистике для сравнения распределений между несколькими группами или наборами данных (рис. 6). На протяжении всего летнего сезона 2023 г. на тестовом участке р. Витим наблюдаются повышенные значения индекса AMWI, которые с большой долей вероятности связаны с деятельностью многочисленных золотодобывающих предприятий, расположенных в бассейне реки. ГИС-анализ выявил, что в бассейне Витима, площадь которого составляет 225 тыс. км², на сегодня действуют 678 лицензионных участков, занимающие 32 тыс. км². Из них на 461 участок

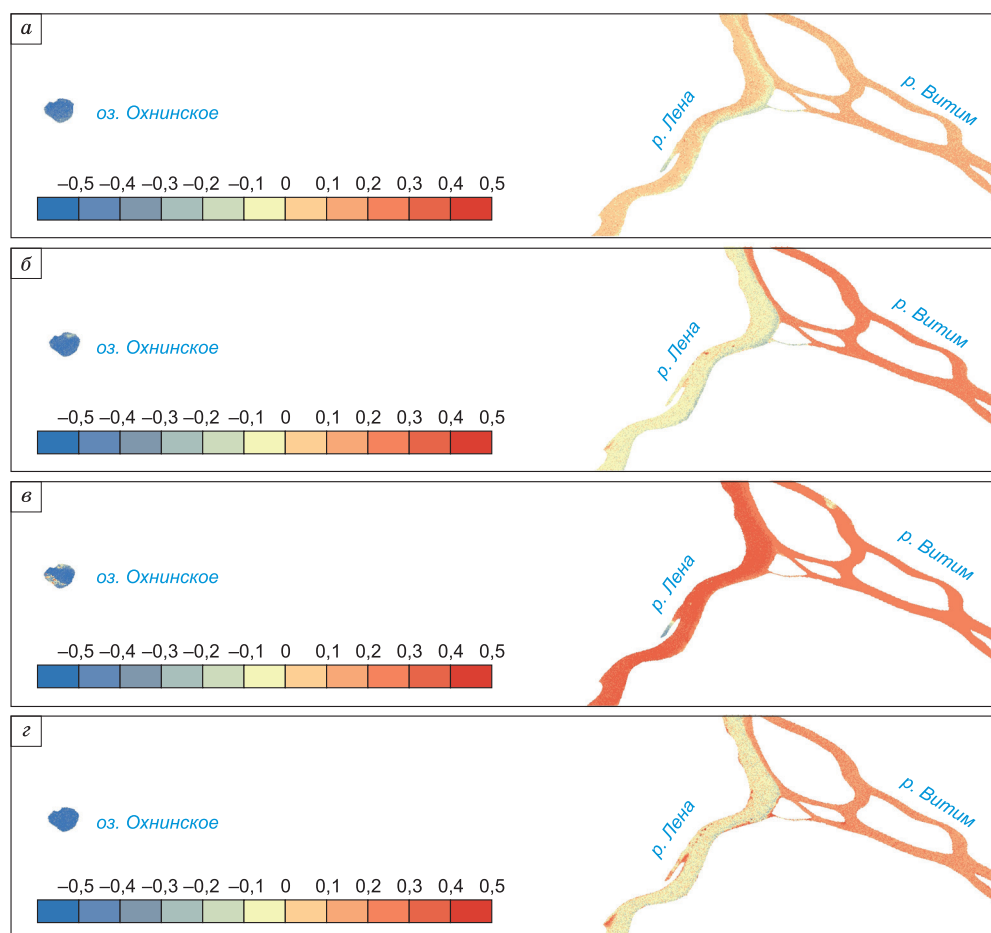


Рис. 5. Распределение индекса AMWI в районе устья р. Витим по данным спутниковых снимков Sentinel-2 2023 г.: а – 13 июня; б – 16 июля; в – 22 августа; г – 4 сентября

Fig. 5. AMWI distribution in the area of the Vitim River mouth according to Sentinel-2 satellite image data: а – June 13, 2023; б – July 16, 2023; в – August 22, 2023; г – September 4, 2023

лицензия была выдана на геологическое изучение (поиск и оценку), на 98 участков – разведку и добычу, и на 119 участков выдана так называемая сквозная лицензия, включающая и геологическое изучение, и разведку и добычу полезных ископаемых. По значениям AMWI можно констатировать, что пик деятельности золотодобычи приходится на июль и август.

Высокие значения AMWI на тестовом участке реки Лена объясняются тем, что в бассейнах рек Большая Чуя и Чая, которые впадают в Лену выше устья Витима, расположены 19 лицензионных участков золотодобычи, часть из которых активно функционируют. Так, 22 августа 2023 г. здесь было зафиксировано значение AMWI, заметно превышающее максимальные индексы реки Лена (см. рис. 5 и 6). Такой же резкий всплеск AMWI наблюдался в августе 2018 г. на р. Вилуй, после аварийного прорыва дамб дражных кот-

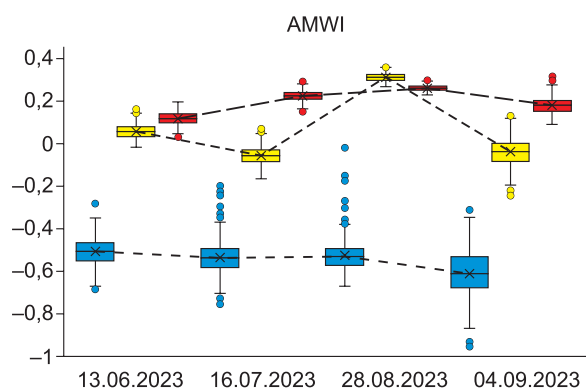


Рис. 6. Динамика индекса AMWI в районе устья р. Витим по данным спутниковых снимков Sentinel-2

Fig. 6. AMWI dynamics in the area of the Vitim River mouth based on Sentinel-2 satellite image data

лованов на месторождении «Иреляхская россыпь», который послужил причиной масштабного загрязнения водных объектов рек Ирелях, Малая Ботубоя и Виллой. Поэтому можно предположить, что кратковременное, но значительное загрязнение р. Лена в августе 2023 г. также могло быть вызвано аварийным или несанкционированным сбросом загрязняющих веществ в реку на одном из золотодобывающих предприятий (см. рис. 5 и 6).

В целом, применение в дальнейшем методов дистанционного зондирования Земли в системе экологического мониторинга в речных системах Якутии имеет большую перспективу. Предложенная нами методика с использованием индекса AMWI является наиболее подходящей для оперативной оценки состояния водных объектов и своевременного принятия превентивных природоохранных мероприятий.

Заключение

Многолетними исследованиями НИИПЭС СВФУ выявлено, что при техногенном воздействии объектов горнодобывающей промышленности трансформация аллювиальных ландшафтных комплексов выражается не только в загрязнении рек химическими элементами-токсикантами и мелкодисперсными взвесями, но и в деградации почвенно-растительного покрова речных пойм, нарушении теплового режима многолетнемерзлых грунтов, образовании новых техногенно-преобразованных ландшафтов, а также в полном уничтожении мест обитания ихтиофауны на участках промышленной отработки, донных биоценозов при отведении русла рек и т. д.

Разработка россыпных месторождений золота является источником поступления избыточного количества минеральных взвесей в водотоки. Большая часть продуктов эрозии антропогенного происхождения, особенно мелкие фракции, уносится потоком во взвешенном состоянии на большие расстояния.

Результаты исследований показали, что использование спектральных характеристик спутниковых снимков позволяет не только выявить наличие взвешенных частиц в воде и степень их загрязнения, но и установить пространственно-временные закономерности распределения мутности водных объектов, оперативно контролировать их экологическое состояние. Для оценки мутности поверхностных вод в районе устья р. Витим наилучшие результаты среди тестируемых водных индексов получены при использовании индекса AMWI.

В связи с этим предложенная нами методика с использованием индекса AMWI может применяться для оперативной оценки состояния водных объектов Якутии в условиях их активного техногенного загрязнения, с целью своевременного принятия превентивных природоохранных мероприятий.

Список литературы / References

1. Саввинов Г.Н. *Эколого-почвенные комплексы Якутии*. М.: Недра; 2007. 312 с.
Savvinov G.N. *Ecological and soil complexes in Yakutia*. Moscow: Nedra; 2007. 312 p. (In Russ.)
2. Lacaux J.P., Tourre Y.M., Vignolles C., et al. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*. 2006;106(1): 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>
3. 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;(15)2:144–158. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-144-158>
4. Berezina O.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K. The use of multi-temporal satellite images for environmental assessment in coal mining areas (by example of closed Kizel coal basin). *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2018;(15)2:144–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-144-158>
5. Härmä P., Vepsäläinen J., Hannonen T., et al. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland. *Science of the Total Environment*. 2001;268(1-3):107–121. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00688-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00688-4)
6. Голик В.И., Комащенко В.И., Дребенштедт К. *Охрана окружающей среды*. М.: Высш. школа; 2007. 270 с.
Golik V.I., Komashchenko V.I., Drebenshtedt K. *Environmental protection*. Moscow: Vyssh. shkola Publ.; 2007. 270 p. (In Russ.)
7. Логачев А.В., Голик В.И. Минимизация вредных последствий добычи золота на Дальнем Востоке. *Вестник ДВО РАН*. 2009;146(4):97–102.
Logachev A.V., Golik V.I. Minimization of harmful consequences of extraction of gold in the Far East. *Vestnik of the Far East branch of the Russian Academy of Sciences*. 2009;(4):97–102. (In Russ.)
8. Сотников В.И. Влияние рудных месторождений и их отработки на окружающую среду. *Соросовский образовательный журнал*. 1997;(5):62–65.
Sotnikov V.I. The influence of ore deposits and their processing on environment. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*. 1997;(5):62–65. (In Russ.)
9. Росляков Н.А., Кириллова О.В. Ртутное загрязнение при добыче золота в России. *Химия в интересах устойчивого развития*. 1995;(3):43–56.

Roslyakov N.A., Kirillova O.V. Mercury pollution during gold mining in Russia. *Chemistry for Sustainable Development*. 1995;(3):43–56. (In Russ.)

9. Антонинова Н.Ю. *Экологическая реабилитация установок кучного выщелачивания (на примере Сафьяновского месторождения)*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь; 2007. 137 с.

Antoninova N.Yu. *Environmental remediation of leaching facilities (on the example of Safyanovskoye deposit)*: Abstr. Diss. ... Cand. Sci. Perm. 2007. 137 p. (In Russ.)

10. Шаякубов Т.Ш. *Золоторудное месторождение Мурунтау*. Ташкент: ФАН; 1998. 539 с.

Shayakubov T.Sh. *Muruntau gold deposit*. Tashkent; FAN Publ.; 1998. 539 p. (In Russ.)

11. Толстов Е.А., Прохоренко Г. А., Браунли Дж. Кучное выщелачивание золота из забалансовой руды карьера Мурунтау на совместном предприятии «Зарафшан-Ньюмонт». *Цветные металлы*. 1999;(7):53–56.

Tolstov E.A., Prokhorenko G. A., Braunli D. Heap leaching of gold from off-balance ore of the Muruntau quarry at the Zarafshan-Nyomont joint venture. *Tsvetnye Metally*. 1999;(7):53–56. (In Russ.)

12. Курганович К.А. Использование нормализованного разностного индекса мутности воды NDTI для дистанционного мониторинга содержания взвешенных веществ в водах рек. В кн.: *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: Материалы XXII Международной научно-практической конференции. г. Чита, 28 ноября – 02 декабря 2022 г. Часть 2*. Чита: Забайкальский государственный университет; 2022. С. 142–147.

Kurganovich K.A. Use of the normalized difference water turbidity index NDTI for remote monitoring of the content of suspended substances in river waters. In: *Kulagin readings: equipment and technologies of production processes: Materials of the 22nd International Scientific and Practical Conference, Chita, November 28 – December 2, 2022. Part 2*. Chita: Transbaikal State University; 2022, pp. 142–147. (In Russ.)

13. Кочев Д.В., Эмих Н.А., Курганович К.А. Дистанционный мониторинг качества поверхностных вод водных объектов как фактор решения социально-экономических проблем Азиатско-Тихоокеанского региона. В кн.: *Научный вектор в АТР: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, г. Чита, 10–11 ноября 2022 г. Часть 1*. Чита: Забайкальский государственный университет; 2022. С. 35–39.

Kochev D.V., Emikh N.A., Kurganovich K.A. Remote monitoring of the quality of surface waters of water bodies as a factor in solving socio-economic problems of the Asia-Pacific region. In: *Scientific vector in the Asia-Pacific region: materials of the international scientific and practical conference of young scientists, Chita, November 10–11, 2022. Part 1*. Chita: Transbaikal State University; 2022, pp. 35–39. (In Russ.)

14. Шевченко И.А. Определение экологического состояния водоемов Киева по данным дистанционного зондирования Земли. *Мелиорация*. 2017;1(79):76–80.

Shevchenko I.A. Diagnostic of ecological state of water bodies in Kiev via remote sensing. *Land Reclamation*. 2017;(1):76–80. (In Russ.)

15. Тихомиров О.А., Бочаров А.В. Использование данных дистанционного зондирования для оценки показателей мутности воды водных объектов. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология*. 2016;(1):5–11.

Tikhomirov O.A., Bocharov A.V. Use of sensor for evaluation of indicators turbidity content in water reservoir. *Herald of Tver State University. Series: Geography and Geoecology*. 2016;(1):5–11. (In Russ.)

16. Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б. и др. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*. 2016;(2):230–244.

Tikhomirov O.A., Bocharov A.V., Komissarov A.B., et al. Use of sensor landsat 8 (OLI) for evaluation of indicators turbidity, color and chlorophyll content in water reservoir Ivankovskoye. *Herald of Tver State University. Series: Chemistry*. 2016;(2):230–244. (In Russ.)

17. Тихонова С.А., Стручкова Г.П., Капитонова Т.А. Оценка антропогенного загрязнения водоемов Якутии по спектральным характеристикам космоснимков. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021;(12–1):213–222. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_213

Tikhonova S.A., Struchkova G. P., Kapitonova T.A. Manmade pollution assessment in water bodies in Yakutia using color response curves and satellite images. *Mining informational and analytical bulletin*. 2021;(12–1): 213–222. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_213

Об авторах

САВВИНОВ Григорий Николаевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, директор, <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>, ResearcherID: T-7914-2017, Scopus Author ID: 56028258300, SPIN: 7459-1073, e-mail: savvinov_gn@mail.ru

МАКАРОВ Виктор Семенович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4781-9027>, ResearcherID: H-2289-2019, Scopus Author ID: 57387347600, SPIN: 6635-3508, e-mail: mvs379@yandex.ru

Вклад авторов

Саввинов Г.Н. – разработка концепции, методология, администрирование данных, редактирование рукописи

Макаров В.С. – проведение исследования, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SAVVINOV, Grigory Nikolayevich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Director, <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>, ResearcherID: T-7914-2017, Scopus Author ID: 56028258300, SPIN: 7459-1073, e-mail: savvinov_gn@mail.ru

MAKAROV, Victor Semyonovich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4781-9027>, ResearcherID: H-2289-2019, Scopus Author ID: 57387347600, SPIN: 6635-3508, e-mail: mvs379@yandex.ru

Authors' contribution

Savvinov G.N. – conceptualization, methodology, data curation, review & editing

Makarov V.S. – investigation, formal analysis, original draft

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 08.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 17.05.2024

Принята к публикации / Accepted 29.05.2024