

**Комплексный анализ качества поверхностных вод на основе данных дистанционного зондирования Земли, замеров автоматизированных датчиков и натурных исследований**

© 2025. А. Д. Деменев, к. г.-м. н., с. н. с.,  
 Н. Г. Максимович, к. г.-м. н., доцент, заслуженный эколог РФ,  
 зам. директора по научной работе Естественнонаучного института,  
 О. А. Березина, к. геогр. н., доцент, А. А. Мизев, студент, инженер,  
 В. Т. Хмурчик, д. г.-м. н., в. н. с.,  
 Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
 614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15,  
 e-mail: gtp@psu.ru

В статье рассматриваются вопросы комплексного анализа экологического состояния поверхностных вод на основе использования разработанной многокомпонентной системы мониторинга. Основной целью работы было получить объективную информацию о состоянии вод на основе комплексного анализа данных, получаемых в непрерывном режиме с гидрохимических датчиков, натурных измерений и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Традиционные методы мониторинга, такие как отбор проб и лабораторный анализ, хотя и обеспечивают высокую точность, являются трудоёмкими и не всегда позволяют получить своевременно информацию о состоянии водных объектов. Автоматизированные устройства функционировали в летне-осенний период 2024 г. на двух реках в непосредственной близости от источников загрязнения, также были проведены заверочные наблюдения. Натурные исследования позволили получить детальное представление о концентрациях химических элементов и соединений в водных объектах. При функционировании автоматизированных устройств были выявлены значительные краткосрочные изменения общей минерализации и температуры в р. Косьве, которые могут быть критически важными при оценке экологической ситуации района исследований. Обработка данных ДЗЗ и расчёт индекса АМВИ (Acid Mine Water Index) позволили выявить источники загрязняющих веществ, зоны их переноса и аккумуляции. Постоянный мониторинг водных объектов в подобном режиме обеспечивает поток достоверных данных, что минимизирует риски получения необъективной информации и позволяет своевременно фиксировать возможные изменения гидрохимических параметров, вызванные техногенными и природными факторами.

**Ключевые слова:** мониторинг окружающей среды, речные системы, гидрохимические характеристики, геоинформационные системы, дистанционное зондирование Земли, загрязняющие вещества, автоматизированные датчики.

**Comprehensive analysis of surface water quality based on remote sensing data, automated sensors, and field studies in the post-mining area**

© 2025. A. D. Demenev ORCID: 0000-0003-1086-178X, N. G. Maksimovich ORCID: 0000-0001-6220-2730,  
 O. A. Berezina ORCID: 0000-0001-6491-0722, A. A. Mizev ORCID: 0009-0008-0069-1207,  
 V. T. Khmurchik ORCID: 0000-0001-7629-6168,  
 Perm State National Research University,  
 15, Bukereva St., Perm, Russia, 614068,  
 e-mail: gtp@psu.ru

The article focused on the issues of a comprehensive analysis of the surface waters ecological status using the developed multicomponent monitoring system. The main goal of the study was to obtain objective information on the waters' status based on a comprehensive analysis of data obtained continuously from hydrochemical sensors, in-kind measurements and remote sensing data. Traditional monitoring methods, such as sampling and laboratory analysis, although they provide high accuracy, are labor-intensive and do not always provide an objective status of water bodies. During the analysis of available data and our own research, a system was developed for observations with the selection of the most optimal installation sites for hydrochemical sensors in areas of intense anthropogenic impact as a result of subsoil use. These areas are also highlighted as the most indicative areas for comparison of satellite observations, traditional monitoring results and data obtained from sensors in automated mode. Automated devices operated in 2024 summer-autumn period

on two rivers in the immediate vicinity of pollution sources, and verification observations were also carried out. Field studies provided a detailed idea of the chemical element and their compounds' concentrations in water bodies. During the operation of automated devices, significant short-term changes in total mineralization and temperature in the Kosva River were revealed. This can be critically important in assessing the environmental situation in the study area. Processing of the remote sensing data and calculation of the AMWI (Acid Mine Water Index) index allowed identifying sources of pollutants, zones of their transfer and accumulation. Continuous monitoring of water bodies in such a mode provides a flow of reliable data, which minimizes the risks of obtaining biased information as well as allows timely recording of possible changes in hydrochemical parameters caused by anthropogenic and natural factors.

**Keywords:** environmental monitoring, rivers, hydrochemical characteristics, geoinformation technologies, earth remote sensing, pollutants, automated sensors.

Мониторинг качества вод играет важную роль в управлении водными ресурсами и обеспечении их устойчивого использования, режимные наблюдения традиционно выполняются путём отбора проб в полевых условиях и их последующего анализа в лаборатории. Эти измерения обеспечивают высокую точность, но являются трудоёмким процессом, который представляет собой точечные оценки качества водных объектов во времени и пространстве и не всегда позволяют получить объективную информацию об их состоянии [1, 2].

Растущее техногенное воздействие на водные экосистемы во всём мире требует эффективных и оперативных методов мониторинга вод [3]. Благодаря развитию космических технологий и увеличению применения современных методов, мониторинг качества воды на основе дистанционного зондирования стал использоваться повсеместно и показал свою результативность, как во временных, так и в пространственных масштабах [4–8]. Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) имеет ряд ограничений, в связи с чем для оценки качества вод в зонах интенсивного недропользования, например, в районах техногенного воздействия кислых шахтных вод (КШВ) при угледобыче, целесообразно применение комплексного подхода. Он включает в себя объединение разных типов данных: традиционного отбора проб, спутниковых наблюдений и информацию с автоматизированных датчиков для ведения непрерывного мониторинга гидрохимических параметров, что позволит сформировать принципиально новые знания о временных и пространственных закономерностях состояния компонентов окружающей среды и состояния водных объектов.

Основной целью работы было получить объективную информацию о состоянии поверхностных вод на основе комплексного анализа данных, получаемых в непрерывном режиме с гидрохимических датчиков, натурных измерений и данных ДЗЗ. Подобная

информация необходима для достоверной оценки поверхностных вод в районах с повышенной техногенной нагрузкой, а также для принятия оперативных мер по снижению возможного негативного воздействия на окружающую среду.

### Объекты и методы исследования

Кизеловский угольный бассейн (КУБ) расположен на восточном склоне Уральских гор в Пермском крае, добыча полезных ископаемых ведётся с конца XVIII века. Угленосная толща характеризуется высоким содержанием микроэлементов и серы (до 10%) в форме пирита [9]. Водопритоки при работе шахт составляли до 2500 м<sup>3</sup>/ч в карстовых зонах. Эти два фактора обусловили интенсивное загрязнение окружающей среды при добыче угля [10].

После закрытия шахт в конце 1990-х гг. и прекращения откачки вод из них в течение нескольких лет уровень подземных вод восстановился, и сформировались изливы КШВ на дневную поверхность. Воздействие изливов на поверхностные воды приобрело региональный масштаб. Смешиваясь с речными водами, КШВ при увеличении pH образуют техногенную взвесь, которая содержит в себе большое количество железа – до 2730 мг/дм<sup>3</sup>, алюминия до 210 мг/дм<sup>3</sup>, марганца до 25 мг/дм<sup>3</sup> и другие опасные для окружающей среды компоненты [11]. Далее происходит осаждение взвеси и формирование техногенных донных отложений, которые являются источником вторичного загрязнения. Эти процессы приводят к разрушительным последствиям для водных экосистем [12–16]. Бассейны рек Яйвы и Косвы являются типичными для территории КУБа, поэтому они были взяты в качестве модельных объектов для отработки технологии оперативного мониторинга экологического состояния поверхностных вод на основе комплексного подхода.

Изучение экологического состояния территорий, подверженных негативному влия-

нию КУБа, ведётся на протяжении многих лет, в связи с чем накоплен большой объём фактических данных [5, 17, 18], что позволяет более достоверно верифицировать результаты дистанционных наблюдений. В данной работе впервые приведены результаты комплексного анализа экологического состояния поверхностных вод КУБа, основанного на совместной обработке данных ДЗЗ, данных автоматизированных датчиков и натурных наблюдений.

Совместное использование комплекса данных наблюдений за водными объектами представляет собой значительное преимущество, так как позволяет компенсировать ограничения, присущие их отдельному применению. Данные ДЗЗ эффективно смягчают недостатки традиционного мониторинга, основанного на отборе проб вручную, при котором не всегда обеспечивается объективная оценка масштабных водных объектов, таких как реки и водохранилища. Дешифрование данных ДЗЗ предоставляет возможность анализа характеристик протяжённых водных объектов и труднодоступных территорий. С использованием космических технологий возможно обнаружение источников загрязнения, а также определение зон транзита и осаждения загрязняющих веществ. Однако ключевыми ограничениями для применения данного метода являются пространственное разрешение спутниковых изображений, что предполагает его использование для рек, ширина которых превышает это разрешение, при этом спутниковые данные не позволяют определить детальный химический анализ вод и оценить превышения регламентированных концентраций веществ. Кроме того, существует нестабильность в получении качественных космических данных на протяжении всего периода наблюдения, что может быть связано с погодными явлениями и техническими особенностями аппаратуры. Стабильные ряды наблюдений, отражающие эпизодические или кратковременные изменения гидрохимических параметров, могут быть обеспечены при использовании автоматизированных систем наблюдений и беспроводной передаче данных в режиме реального времени. Именно такая система, предоставляющая данные из нескольких источников информации, может наиболее объективно и достоверно отражать состояние водных объектов.

**Натурные наблюдения.** В ходе натурных исследований в полевых условиях для оперативного анализа и определения показателей

качества воды использовались специализированные приборы. Для определения параметров – рН, TDS (Total Dissolved Solids), удельная электрическая проводимость и температура воды – применялись комбинированные анализаторы воды: HI 98129 Combo и HI 98130 Combo (Hanna, Германия). Для определения содержания общего железа ( $Fe_{\text{общ}}$ ) в воде, характеризующего загрязнение кислыми шахтными водами, использовался портативный колориметр HI 97721 (Hanna, Германия), работающий по методу фотометрии, что позволяет точно определять концентрацию железа в пробах воды на месте. Для общего анализа воды и определения микроэлементного состава производился отбор проб воды с последующей передачей в лабораторию, все работы выполнялись в соответствии с общепринятыми методическими указаниями и нормативными документами.

Пробы вод отбирались в местах установки дистанционных датчиков на реках Косьве и Яйве для дальнейшей верификации результатов, а также контроля поступающей информации с дистанционных гидрохимических датчиков. Дополнительные пункты отбора проб были в самих источниках загрязнений, на расстоянии до и после впадения КШВ в водотоки, а также для фиксации процесса разбавления и образования техногенной взвеси в зоне смешения с речными водами.

**Данные ДЗЗ.** Водный индекс AMWI (Acid Mine Water Index), который разработан для оценки загрязнённых вод в зонах, подверженных влиянию КШВ [5, 17], рассчитан для 64 участков [18] рек Косьвы, Яйвы, Северной Вильвы, а также в пределах территории Камского водохранилища. Индекс на качественном уровне учитывает особенности спектра обратно рассеянного излучения в видимом (красном) и ближнем инфракрасном диапазонах при росте содержания в воде  $Fe_{\text{общ}}$ . Анализируемые участки включают фоновую зону, район поступления загрязнённых вод и участки ниже по течению до устья рек. Анализ и расчёт AMWI проводился на основе данных спутника Sentinel-2 MSI (англ. Multispectral Instrument) уровня обработки Level-2A (коэффициенты спектральной яркости поверхности после атмосферной коррекции с помощью процессора Sen2Cor). Разрешение изображений составляет 10 м. Значения AMWI рассчитаны в программном продукте QGIS с применением инструмента «калькулятор раstra», который использовался для выполнения следующих вычислений:

$$AMWI = \frac{Red - Blue}{Red + Blue},$$

где Red – коэффициент спектральной яркости в красном канале (длина волны – от 0,645 до 0,683 мкм); Blue – коэффициент спектральной яркости в синем канале (длина волны – от 0,448 до 0,545 мкм).

В 2024 г. проанализировано 14 снимков, отобранных за период с 19 мая по 16 сентября, сцены выбраны с минимальной облачностью и отсутствием дымки, что позволило исключить искажения при дешифрировании.

**Автоматизированная система мониторинга гидрохимических параметров.** На первоначальном этапе перед установкой элементов автоматизированной системы мониторинга поверхностных вод было проведено рекогносцировочное обследование с отбором проб и замерами химических параметров вод в период низкой водности. Такие условия позволили определить места расположения датчиков с учётом случаев максимально неблагоприятных гидрологических и гидрохимических условий. Также во внимание было принято, что достаточная ширина реки для использования данных ДЗЗ должна составлять не менее нескольких десятков метров, что связано с разрешением спутниковых данных [5].

Одним из наиболее показательных участков является область впадения р. Северной Вильвы в р. Яйву. Северная Вильва – крупный приток, на водосборе которого расположены все источники загрязнения бассейна р. Яйвы, в этот приток впадают наиболее загрязнённые реки, подверженные влиянию бывших шахт. Стоит отметить, что до впадения р. Северной Вильвы на территории бассейна р. Яйвы источники загрязнения КШВ отсутствуют, что позволяет чётко отделять загрязнённые воды от условно чистых.

Детально была изучена область впадения излива кислых вод шахты им. Калинина в р. Косьву с целью выявления зоны активного образования техногенного осадка и изменения рН. По результатам определения рН, Fe<sub>общ</sub> и минерализации была выделена зона, где происходит наиболее динамичное изменение данных показателей. Установлено, что эта зона представляет наибольший интерес с точки зрения частых автоматизированных замеров гидрохимических параметров. Также этот участок отвечает минимальным требованиям для использования спутниковых данных при ведении мониторинга. Помимо этого, излив шахты им. Калинина является одним из наи-

более загрязнённых и значительных по объёму, что обуславливает формирование участка гидрохимической аномалии в р. Косьве, что также фиксируется на спутниковых снимках.

По результатам обработки данных за многолетний период, натурных исследований и данных изучения гидрохимической обстановки, а также с учётом минимальной ширины водотоков, необходимой для использования спутниковых данных, были выбраны участки для дальнейшего мониторинга и два основных участка для использования автоматизированных датчиков: впадение излива кислых вод шахты им. Калинина в р. Косьву, а также слияние рек Северной Вильвы и Яйвы.

На последующем этапе выполнена установка датчиков. Наибольший интерес при наблюдениях представляет собой параметр TDS как интегральный показатель загрязнения кислыми шахтными водами (также велась регистрация электропроводности и температуры вод). Исходя из технических характеристик используемых датчиков и необходимости энергоэффективного функционирования системы в течение нескольких месяцев без частых замен элементов питания датчиков, оптимальным интервалом для замеров является 30 минут. Опционально возможно подключение внешнего источника питания, заряжаемого от солнечных батарей.

Основными элементами автоматизированной системы мониторинга являлись датчики, регистрирующие гидрохимические параметры, логгеры и система беспроводной передачи данных, а также сервер для хранения поступающих данных.

Доступ к данным осуществляется через веб-ресурс, позволяющий хранить, выгружать, анализировать и визуализировать результаты замеров. Аппаратно-программная структура картографического веб-сервиса построена на основе архитектуры «клиент-сервер» с добавлением компонентов ГИС. В системе выделено три подсистемы: хранения, обработки и предоставления данных.

### Результаты и обсуждение

В ходе полевых исследований получены результаты гидрохимического опробования образцов вод излива, а также речных вод. Результаты показывают, что при поступлении КШВ в речные воды в зоне смешивания происходит снижение значения рН до 3,4, которое ниже по течению восстанавливается практически до первоначальных значений 6,5–7,5

Таблица 1 / Table 1

Результаты гидрохимического опробования, август 2024 г.  
Chemical analysis of water samples, August 2024

№ п/п	Пункты отбора проб Sampling plots	TDS, ppm	pH	Fe, мг/дм <sup>3</sup> mg/L	Al, мг/дм <sup>3</sup> mg/L	Mn, мг/дм <sup>3</sup> mg/L
1	Излив из штольни шахты им. Калинина The discharge from the Kalinin mine	2776±56	3,50±0,05	694±14	17±3	9±1,3
2	Р. Косьва ниже излива из штольни шахты имени Калинина (зона смешения) / The Kosva River, downstream the discharge from the Kalinin mine (mixing zone)	218±4	3,40±0,05	84±2	0,85±0,13	0,38±0,08
3	Р. Косьва ниже впадения шахтных вод шахты 40 лет Октября / The Kosva River, downstream the discharge from the mine named 40 years of the October	280±6	6,50±0,05	0,86±0,02	0,038±0,012	0,55±0,11
4	Река Северная Вильва, выше 0,5 км слияния с р. Яйва / The Severnaya Vilva River, 0.5 km upstream the confluence with the Yayva River	340±7	7,70±0,05	0,6±0,01	<0,02	0,16±0,03
5	Река Яйва, 150 м выше впадения р. Северной Вильвы / The Yayva River, 150 m upstream the confluence with the Severnaya Vilva River	57±1	7,40±0,05	0,37±0,01	0,056±0,014	0,031±0,009
6	Река Яйва, 400 м ниже впадения р. Северной Вильвы / The Yayva River, 400 m downstream the confluence with the Severnaya Vilva River	162±3	7,40±0,05	0,5±0,01	0,086±0,022	0,038±0,011

(табл. 1). Кислые шахтные воды приносят в речную сеть большое количество железа и микроэлементов, что также подтверждается результатами химических анализов воды. Также пробы были отобраны в местах установки датчиков для дальнейшей верификации результатов, получаемых с них.

Автоматизированные устройства функционировали в летне-осенний период на двух реках в непосредственной близости от источников загрязнения. Были получены детальные данные об изменении гидрохимических параметров в точках наблюдения. В процессе совместного функционирования двух датчиков были выявлены значительные краткосрочные колебания значений TDS (соответственно, солёности и электропроводности), а также температуры вод р. Косьвы в районе разлива ш. им. Калинина. Датчик, установленный в устье разлива, на протяжении всего периода наблюдений зафиксировал изменение параметра TDS от 1954 до 2564 ppm (рис. 1). В то же время датчик, расположенный в зоне смешения вод, зафиксировал колебания TDS в диапазоне от 28 до 1326 ppm. Подобные изменения значений в десятки раз могут быть критически важными при оценке экологической ситуации

района исследований. Точечный отбор проб может быть выполнен в любой из периодов изменения гидрохимических параметров, и на основании полученных данных может сформироваться недостоверная картина превышения содержания загрязняющих веществ. Постоянный мониторинг гидрохимических параметров в автоматизированном режиме на особо ответственных участках обеспечивает поток данных в режиме реального времени, что минимизирует риски получения необъективной информации. В ходе анализа установлено, что на химический состав вод на данном участке существенное влияние оказывает процесс разбавления КШВ речными водами, связанный с особенностями режима работы гидротехнического сооружения, расположенного в 20 км выше по течению от пункта замеров.

На участке замеров в районе р. Яйвы подобных краткосрочных колебаний зафиксировано не было, параметр TDS изменялся от 109 до 141 ppm. Однако отмечается формирование тренда на незначительный рост анализируемого показателя, что связано с сезонными изменениями температуры воздуха и количества осадков. Для выявления особенностей гидрохимического режима потребуется продление

ряда наблюдений в следующих сезонах, что позволит наиболее полно характеризовать периоды активного поступления загрязняющих веществ в р. Яйву, фиксируемых по данным ДЗЗ.

Для рек Косьвы и Северной Вильвы продолжается серия наблюдений за изменением индекса, характеризующего спектральные свойства поверхностных водотоков, загрязнённых КШВ, известного как индекс АМВИ (Acid Mine Water Index) (рис. 2, см. цв. вкладку III) [17]. Ранее было установлено, что абсолютные значения данного индекса не всегда отражают истинный уровень загрязнения реки [18], что связано с изменением спектральных характеристик водной поверхности в зависимости от климатических и сезонных факторов, миграции и осаждения железосодержащих соединений, концентрации взвешенных частиц и других факторов, оказывающих влияние на спектральные свойства водной поверхности в момент проведения анализа. Для корректного анализа данных, получаемых за различные периоды наблюдений, применяется нормировка значений в диапазоне от 0 до 1, что позволяет оценить степень загрязнения относительно условно чистого и самого загрязнённого участка, которые были выведены авторами на основе данных ДЗЗ и точечного отбора проб.

В 2024 г. был проведён расчёт АМВИ для вод р. Косьвы (табл. 2, рис. 2, см. цв. вкладку III), где амплитуда значений минимального и максимального показателей варьировала

от 0,061 до 0,078. Фоновым (условно чистым) участком было выбрано Широковское водохранилище, где АМВИ демонстрировал минимальные значения около нуля. Наиболее загрязнённым оказался участок, расположенный в районе разгрузки шахтных вод из шахты им. Калинина, где индекс варьировал от 0,039 до 0,060. В районе разгрузки шахты им. 40 лет Октября, расположенной выше по течению, значения индекса колебались от -0,010 до 0,024, что при нормировке даёт показатель в пределах от 0,21 до 0,74. В нижнем течении реки вблизи источников загрязнения наблюдается снижение значений индекса.

Расчёт АМВИ для р. Яйвы (табл. 2, рис. 3, 4, см. цв. вкладки IV, V) и её основного источника загрязнения – р. Северной Вильвы – показал амплитуду от 0,089 до 0,299. Максимальные значения были зафиксированы в летний период, когда индекс превышал 0,200, тогда как в весенний и осенний сезоны он оставался ниже 0,170, что может быть связано с сезонными колебаниями уровня воды. Участок р. Яйвы, расположенный выше устья р. Северной Вильвы, являлся фоновым с индексом около нуля. Устье р. Северной Вильвы характеризовалось наиболее высокими значениями индекса, достигающими 0,310. Расстояние между фоновым участком и зоной максимального загрязнения составило 0,6 км. В зоне смешения в зависимости от времени года нормированные значения варьировали от 0,28 до 0,85, что свидетель-

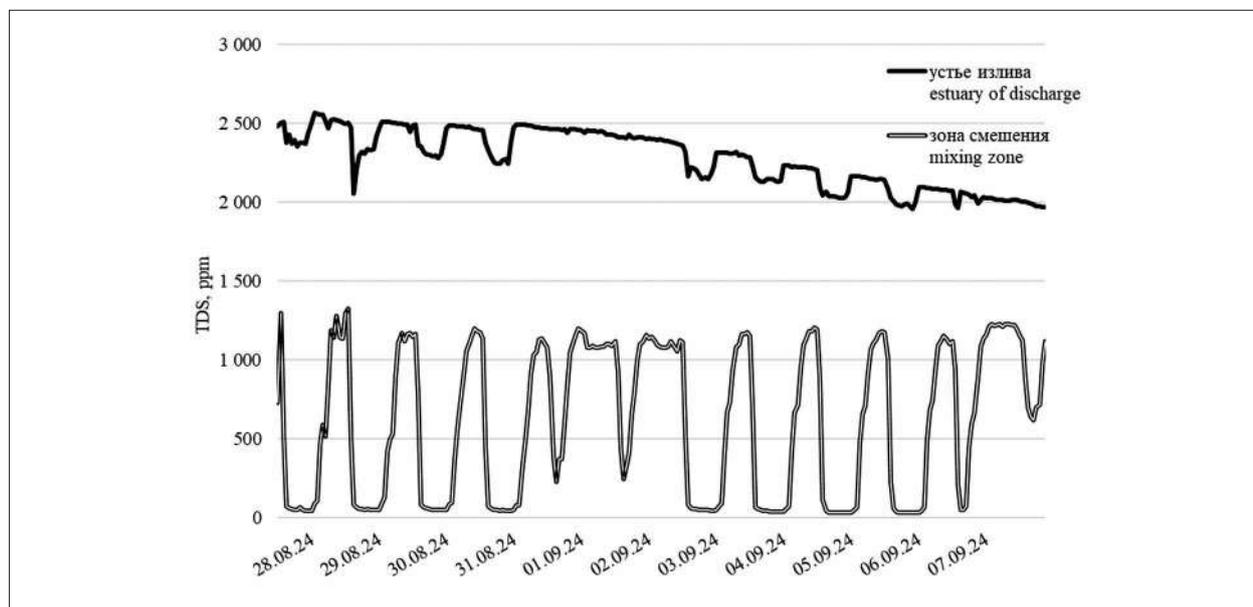
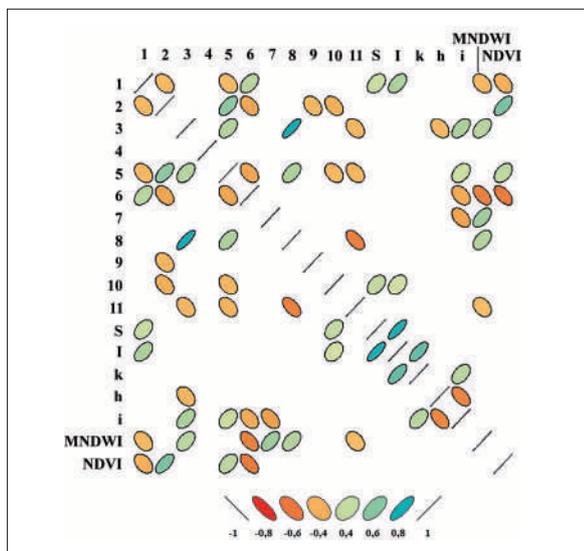


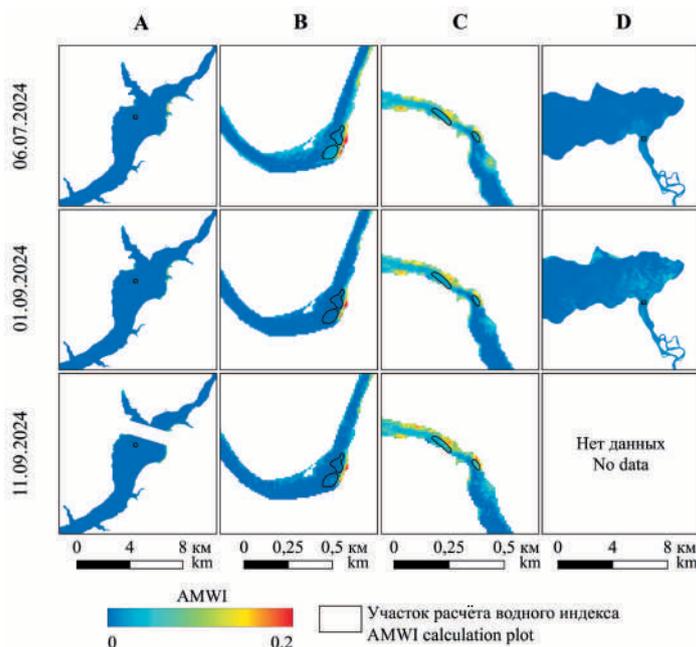
Рис. 1. TDS в районе впадения излива кислых вод шахты им. Калинина в р. Косьву (2024 г.)  
 Fig. 1. Total dissolved solids (TDS, ppm) in the Kalinin mine discharge and the Kosva River water mixing zone (2024)

**Д. А. Каверин, С. В. Якубенко, С. В. Денева, А. В. Пастухов**  
**«Геоинформационный анализ ландшафтной дифференциации**  
**дренированных озёрных котловин**  
**Юго-Востока Большеземельской тундры». С. 26.**



**Рис. 4.** Статистически значимые значения коэффициентов корреляции по Спирмену ( $p < 0,05$ ) между площадью различных типов природно-территориальных комплексов (обозначены цифрами), морфометрическими характеристиками озёрных котловин и их спектральными индексами. Морфометрические характеристики: S – площадь, га; I – длина береговой линии, км; k – коэффициент извилистости береговой линии; h – абсолютная высота, м; i – уклон береговой линии, градусы. Спектральные индексы: NDVI, MNDWI / **Fig. 4.** Statistically significant values of Spearman correlation coefficients ( $p < 0.05$ ) between the area of different types of natural territorial complexes (indicated by numbers), morphometric characteristics of lake basins and their spectral indices. Morphometric characteristics: S – area, ha; I – coastline length, km; k – coefficient of coastline tortuosity; h – absolute height, m; i – coastline slope, degrees. Spectral indices: NDVI, MNDWI

**А. Д. Деменев, Н. Г. Максимович, О. А. Березина, А. А. Мизев,**  
**В. Т. Хмурчик «Комплексный анализ качества поверхностных вод**  
**на основе данных дистанционного зондирования Земли, замеров**  
**автоматизированных датчиков и натурных исследований». С. 46.**



**Рис. 2.** AMWI для контролируемых участков р. Косвы (2024 г.)  
 А – Широковское водохранилище, фон; В – р. Косва ниже впадения шахтных вод из шахты 40 лет Октября; С – р. Косва, район разгрузки шахтных вод из шахты им. Калинина; D – Камское водохранилище, устье р. Косвы / **Fig. 2.** AMWI of the Kosva River studied sites (2024 yr.)  
 A – Shirokovskoe reservoir, background; B – the Kosva River downstream the discharge of the 40 years of the October mine; C – the Kosva River downstream the discharge of the Kalinin mine; D – Kama reservoir, the Kosva River estuary

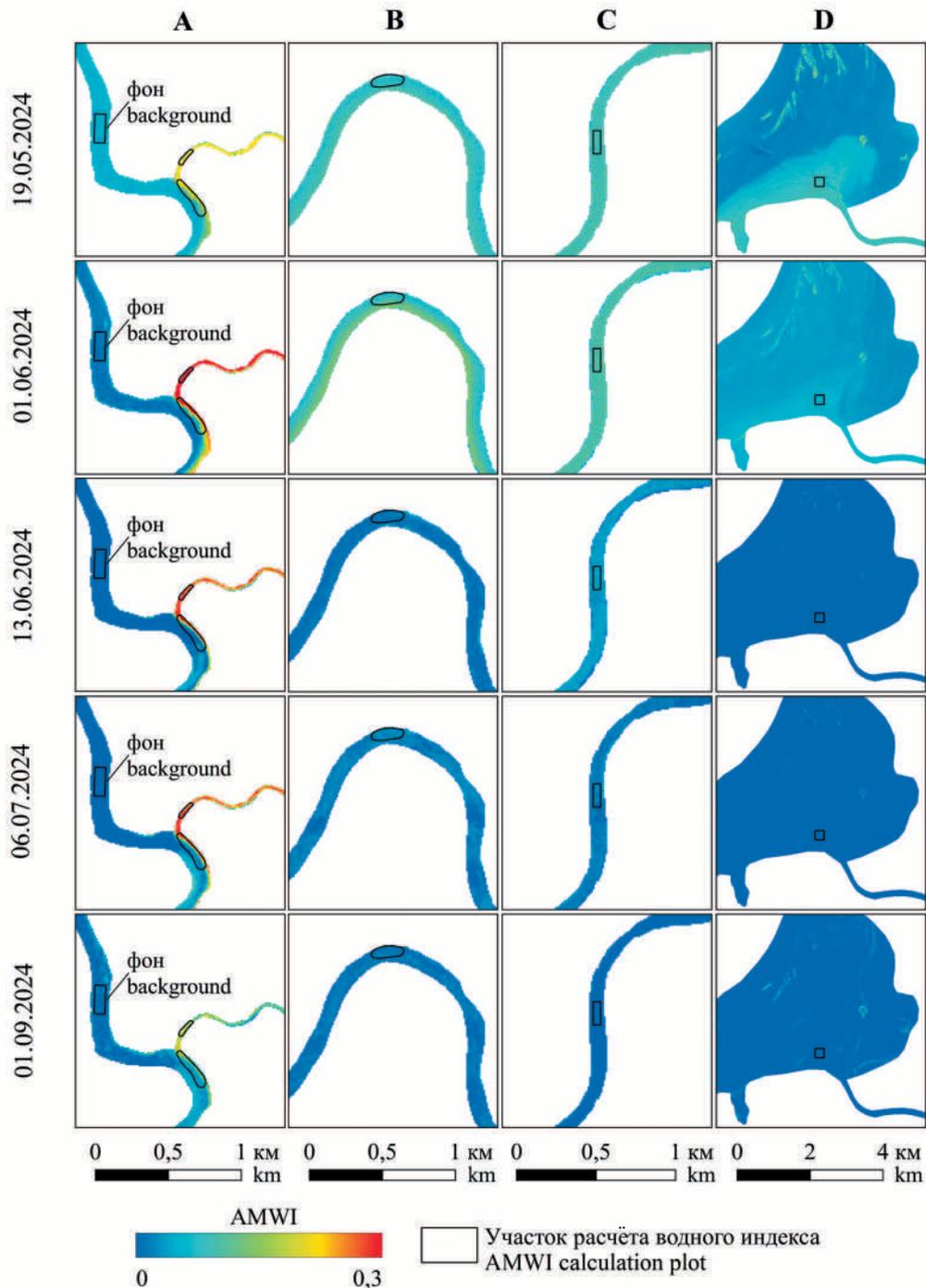


Рис. 3. AMWI для контролируемых участков р. Яйвы (2024 г.)

А – впадение р. Северной Вильвы в р. Яйву; В – р. Яйва, 5 км ниже устья р. Северной Вильвы;  
С – р. Яйва, 20 км ниже устья р. Северная Вильва; D – Камское водохранилище, устье р. Яйва

Fig. 3. AMWI of the Yayva River studied sites (2024)

A – Severnaya Vilva and the Yayva rivers confluence; B – the Yayva River, 5 km downstream  
the Severnaya Vilva River estuary; C – the Yayva River, 20 km downstream the Severnaya Vilva River;  
D – Kama reservoir, the Yayva River estuary

А. Д. Деменев, Н. Г. Максимович, О. А. Березина, А. А. Мизев,  
В. Т. Хмурчик «Комплексный анализ качества поверхностных вод  
на основе данных дистанционного зондирования Земли, замеров  
автоматизированных датчиков и натуральных исследований». С. 46.

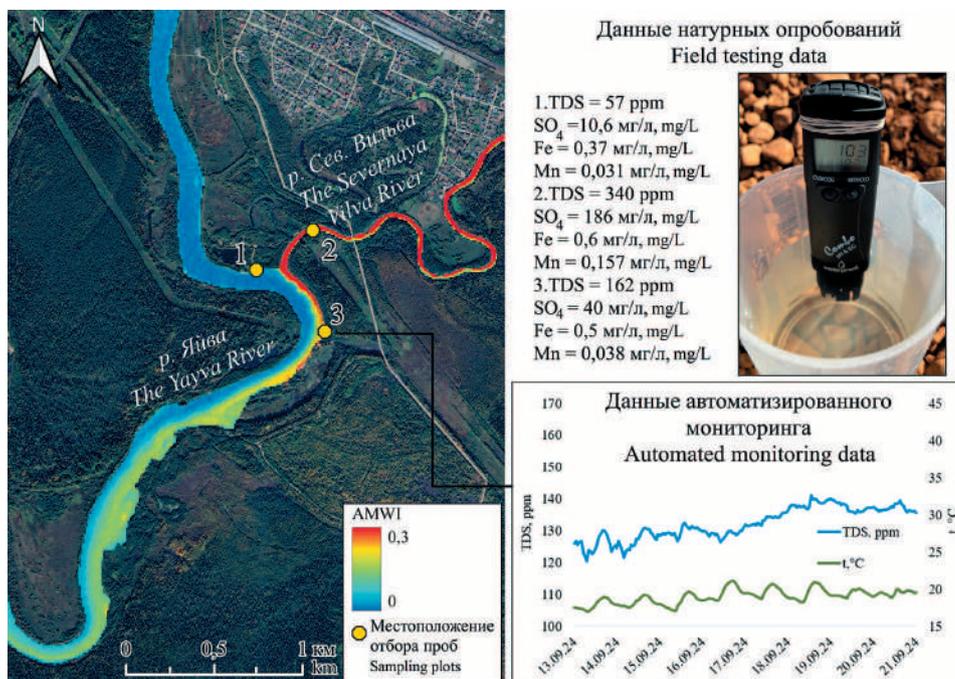


Рис. 4. Совместное использование различных типов данных на примере р. Яйвы  
Fig. 4. Sharing different data types from the Yayva River catchment during monitoring

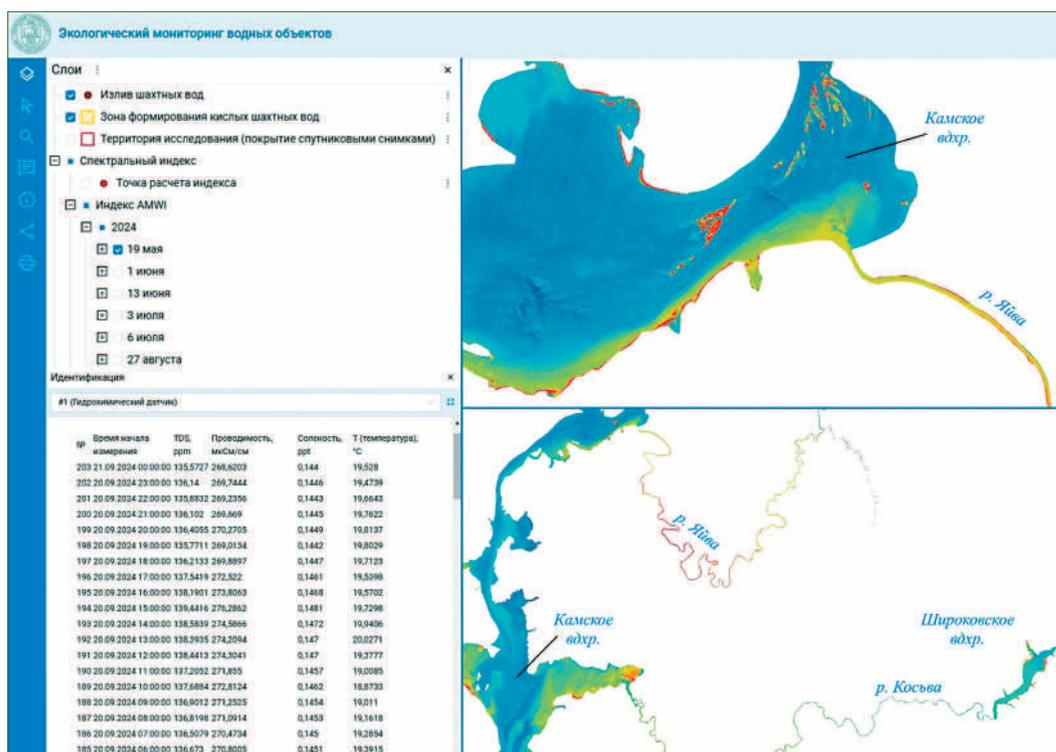


Рис. 5. Интерфейс картографического веб-сервиса «Экологический мониторинг водных объектов»  
Fig. 5. Interface of Web Map Service “Environmental monitoring of water bodies”

Таблица 2 / Table 2

Значения АМВИ и степени загрязнения для водных участков р. Яйвы и р. Косьвы в 2024 г.  
AMWI values and water pollution degree of the Yaouva and the Kosva rivers (2024)

Наименование участка Studied site	Дата / Date						
	19.05.2024	01.06.2024	13.06.2024	06.07.2024	01.09.2024	11.09.2024	16.09.2024
Бассейн р. Яйвы / The Yaouva River catchment							
Р. Яйва выше устья р. Северной Вильвы, фон The Yaouva River upstream the Severnaya Vilva River estuary, background values	0,047 0,00	0,011 0,00	-0,035 0,00	-0,024 0,00	-0,022 0,00	-0,022 0,00	0,002 0,00
Устье р. Северной Вильвы / The Severnaya Vilva River estuary	<b>0,201</b> <b>1,00</b>	<b>0,310</b> <b>1,00</b>	<b>0,181</b> <b>1,00</b>	<b>0,180</b> <b>1,00</b>	<b>0,141</b> <b>1,00</b>	<b>0,067</b> <b>1,00</b>	<b>0,162</b> <b>1,00</b>
Р. Яйва ниже впадения р. Северной Вильвы (зона смешения) / The Yaouva River, downstream the Severnaya Vilva River (mixing zone)	0,131 0,85	0,146 0,49	0,050 0,39	0,063 0,43	0,024 0,28	0,035 0,64	0,078 0,48
Р. Яйва, 5 км ниже устья р. Северной Вильвы The Yaouva River, 5 km downstream the Severnaya Vilva River estuary	0,076 0,49	0,087 0,29	0,010 0,21	0,021 0,22	0,011 0,20	-0,005 0,19	0,026 0,16
Р. Яйва, 20 км ниже устья р. Северной Вильвы The Yaouva River, 20 km downstream the Severnaya Vilva River	0,095 0,62	0,096 0,32	0,031 0,30	0,015 0,19	-0,013 0,06	-0,009 0,15	-
Устье р. Яйва, 138 км ниже устья р. Северной Вильвы The Yaouva River estuary, 138 km downstream the Severnaya Vilva River estuary	0,086 0,56	0,052 0,17	-0,013 0,10	-0,004 0,10	-0,019 0,02	-	-
Бассейн р. Косьвы / The Kosva River catchment							
Широковское водохранилище, фон / Shirokovskoe reservoir, background values	-	-	-	-0,021 0,00	-0,025 0,00	-0,018 0,00	-
Р. Косьва ниже впадения шахтных вод из шахты 40 лет Октября, 18 км от Широковского водохранилища / The Kosva River downstream the discharge of the 40 years of the October mine, 18 km downstream the Shirokovskoe reservoir	-	-	-	0,024 0,074	-0,010 0,55	-0,002 0,21	-
Р. Косьва, район разгрузки шахтных вод из шахты им. Калинина, 19 км от Широковского водохранилища The Kosva River downstream the discharge of the Kalinin mine, 19 km downstream the Shirokovskoe reservoir	-	-	-	<b>0,040</b> <b>1,00</b>	<b>0,039</b> <b>1,00</b>	<b>0,060</b> <b>1,00</b>	-
Р. Косьва, 100 м ниже разгрузки шахтных вод из ш. им. Калинина (зона смешения), 19,1 км от Широковского водохранилища / The Kosva River, 100 m downstream the discharge of the Kalinin mine (mixing zone), 19.1 km downstream the Shirokovskoe reservoir	-	-	-	0,035 0,92	0,032 0,89	0,046 0,82	-
Р. Косьва, п. Перемское 97 км от Широковского водохранилища The Kosva River at Peremskoe settlement, 97 km downstream the Shirokovskoe reservoir	-	-	-	0,011 0,52	0,005 0,47	0,007 0,32	-
Устье р. Косьвы, 128 км от Широковского водохранилища The Kosva River estuary, 128 km downstream the Shirokovskoe reservoir	-	-	-	0,009 0,49	0,005 0,47	-	-

Примечание: в числителе приведено значение АМВИ, в знаменателе – степень загрязнения; «-» – нет данных; жирным шрифтом выделены максимальные значения АМВИ, которые при расчёте степени загрязнения приравнены к 1.

Note: the AMWI values is in the numerator, the degree of contamination is in the denominator; “-” – no data; maximum AMWI values equated to 1 are marked in bold.

ствуется о динамично изменяющемся характере этого участка.

Ниже по течению с удалением от источников загрязнения наблюдается снижение значений индекса и степени загрязнения, что характерно как для р. Косьвы, так и для р. Яйвы. Это связано с осаждением техногенной взвеси, влияющей на спектральные свойства водной поверхности, что, вероятно, приводит к восстановлению показателей, приближающихся к фоновым спектральным значениям.

Потребителями данных разрабатываемой автоматизированной системы мониторинга могут быть пользователи различных платформ. Для этого разработано приложение на базе сервиса NextGIS (<https://hydrogeo.nextgis.com>). На текущем этапе картографический веб-сервис содержит данные результатов полевого опробования и измерений гидрохимических параметров, поступающие с датчиков, а также результаты обработки данных ДЗЗ, фотоматериалы и описание (рис. 5, см. цв. вкладку V). По мере развития проекта геопортал может расширяться, а предложенная архитектура усложняться и включать в себя дополнительные модули. Тематические продукты представлены в растровом и векторном форматах, сервисом поддерживаются стандартные расширения, используемые в ГИС-среде: GeoTIFF, ESRI Shapefile, GeoJSON и т. д. Доступ к картографическому сервису может регулироваться от общедоступного до частного с необходимостью авторизации.

На основе результатов, полученных в рамках исследований, установлено, что для каждого элемента системы мониторинга поверхностных вод выбор контролируемых показателей, а также сама концепция наблюдений должны основываться на следующей информации:

- характеристике и особенностях техногенного воздействия на водные объекты территории исследований;
- технической возможности и функциональных характеристиках измерительных устройств автоматизированной сети;
- продолжительности благоприятного сезона для функционирования комплексной системы мониторинга;
- сочетания экономической целесообразности и полноты информации, базирующейся на результатах полевых исследований, выполняемых традиционными методами с отбором проб и их анализом;
- особенностях покрытия территории исследований спутниковыми снимками, имею-

щимися в свободном доступе и отвечающими минимальным требованиям для расчёта спектральных индексов и обработки спутниковой информации для последующей подготовки тематических картографических продуктов.

## Заключение

Исследования проводились на территории Кизеловского угольного бассейна (Пермский край), где на постэксплуатационном этапе в настоящее время в бассейны рек Яйвы, Косьвы, Чусовой поступают кислые шахтные воды, а также стоки с породных отвалов.

В ходе анализа имеющихся данных и собственных исследований была разработана система для наблюдений с выбором наиболее оптимальных точек установки гидрохимических датчиков в зонах интенсивного техногенного воздействия в результате недропользования. К ним относится участок в районе впадения излива кислых вод шахты им. Калинина, а также участок устья р. Северной Вильвы, также эти районы выделены как наиболее показательные области для сравнения спутниковых наблюдений, результатов традиционного мониторинга и данных, получаемых с датчиков в автоматизированном режиме.

Натурные исследования позволили получить детальное представление о концентрациях химических элементов и соединений в водных объектах. При функционировании автоматизированных устройств были выявлены значительные краткосрочные изменения TDS и температуры в р. Косьве, которые могут быть критически важными при оценке экологической ситуации района исследований. Обработка данных ДЗЗ и расчёт AMWI позволили выявить источники загрязняющих веществ, зоны их переноса и аккумуляции.

Постоянный мониторинг водных объектов в подобном режиме обеспечивает поток достоверных данных, что минимизирует риски получения необъективной информации и позволяет своевременно фиксировать возможные изменения гидрохимических параметров, вызванные техногенными и природными факторами.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российской государственной академии наук № 23-77-01081, <https://rscf.ru/project/23-77-01081>*

## Литература

1. Chapin T.P. High-frequency, long-duration water sampling in acid mine drainage studies: A short review of

current methods and recent advances in automated water samplers // *Appl. Geochem.* 2015. V. 59. P. 118–124. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.04.004. 12

2. Madrid Y., Zayas Z.P. Water sampling: traditional methods and new approaches in water sampling strategy // *Trends in Analytical Chemistry.* 2007. V. 26. No. 4. P. 293–299. doi: 10.1016/j.trac.2007.01.002

3. Лупян Е.А., Константинова А.М., Балашов И.В., Кашницкий А.В., Саворский В.П., Панова О.Ю. Разработка системы анализа состояния окружающей среды в зонах расположения крупных промышленных объектов, хвостохранилищ и отвалов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2020. Т. 17. № 7. С. 243–261. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-243-261

4. Ашихмина Т.Я., Дабах Е.В., Кантор Г.Я., Тимонов А.С., Домнина Е.А., Кутявина Т.И. Мониторинг подземных и поверхностных вод в районе предприятий по утилизации опасных промышленных отходов // *Теоретическая и прикладная экология.* 2024. № 4. С. 105–114. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-105-114

5. Ryankov S.V., Maximovich N.G., Khayrulina E.A., Berezina O.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K. Monitoring acid mine drainage's effects on surface water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 satellite images // *Mine Water Environ.* 2021. V. 40. P. 606–621. doi: 10.1007/s10230-021-00761-7

6. Isgró M.A., Basallote M.D., Caballero I., Barbero L. Comparison of UAS and Sentinel-2 multispectral imagery for water quality monitoring: A case study for acid mine drainage affected areas (SW Spain) // *Remote Sens.* 2022. V. 14. No. 16. Article No. 4053. doi: 10.3390/rs14164053

7. Hanelli D., Barth A., Volkmer G., Köhler M. Modeling of acid mine drainage in open pit lakes using Sentinel-2 time-series: a case study from Lusatia, Germany // *Minerals.* 2023. V. 13. No. 2. Article No. 271. doi: 10.3390/min13020271

8. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Stochkov A. Comparison of *in situ* and remote-sensing methods to determine turbidity and concentration of suspended matter in the estuary zone of the Mzymta River, Black Sea // *Remote Sens.* 2021. V. 13. No. 1. Article No. 143. doi: 10.3390/rs13010143

9. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Пермский гос. национ. исслед. ун-т, 2018. 288 с.

10. Имайкин А.К., Имайкин К.К. Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2013. 112 с.

11. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Березина О.А., Деменев А.Д. Миграция микроэлементов в речной системе в зоне влияния изливов кислых шахтных

вод Кизеловского угольного бассейна // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2024. № 2. С. 23–34. doi: 10.25018/0236\_1493\_2024\_2\_0\_23

12. Янин Е.П. Особенности воздействия на окружающую среду разработки угольных месторождений // *Экол. экспертиза. Обз. инф.* 2019. № 6. С. 2–59. doi: 10.36535/0869-1010-2019-06-1

13. Anderson J.E., Robbins E.I. Spectral reflectance and detection of iron-oxide precipitates associated with acidic mine drainage // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1998. V. 64. No. 12. P. 1201–1208.

14. Chen M., Li F., Tao M., Hu L., Shi Y., Liu Y. Distribution and ecological risks of heavy metals in river sediments and overlying water in typical mining areas of China // *Mar. Pollut. Bull.* 2019. V. 146. P. 893–899. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.07.029

15. Gammons C.H., Nimick D.A., Parker S.R. Diel cycling of trace elements in streams draining mineralized areas – a review // *Appl. Geochem.* 2015. V. 57. P. 34–44. doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.05.008.

16. González-Toril E., Llobert-Brossa E., Casamayor E.O., Amann R., Amils R. Microbial ecology of an extreme acidic environment, the Tinto River // *Appl. Environ. Microbiol.* 2003. V. 69. No. 8. P. 4853–4865. doi: 10.1128/AEM.69.8.4853-4865.2003

17. 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

18. Деменев А.Д., Березина О.А., Максимович Н.Г., Мизев А.А. Оценка состояния поверхностных вод в зоне интенсивного техногенного воздействия на основе данных дистанционного зондирования Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2024. Т. 21. № 2. С. 271–285. doi: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-271-285

## References

1. Chapin T.P. High-frequency, long-duration water sampling in acid mine drainage studies: A short review of current methods and recent advances in automated water samplers // *Appl. Geochem.* 2015. V. 59. P. 118–124. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.04.004. 12

2. Madrid Y., Zayas Z.P. Water sampling: traditional methods and new approaches in water sampling strategy // *Trends in Analytical Chemistry.* 2007. V. 26. No. 4. P. 293–299. doi: 10.1016/j.trac.2007.01.002

3. Loupian E.A., Konstantinova A.M., Balashov I.V., Kashnitskii A.V., Savorskiy V.P., Panova O.Yu. Development of a system for analyzing the state of environment in areas of large industrial facilities, tailings and dumps //

Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. V. 17. No. 7. P. 243–261 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-243-261

4. Ashikhmina T.Ya., Dabakh E.V., Kantor G.Ya., Timonov A.S., Domnina E.A., Kut'yavina T.I. Monitoring of ground and surface water in the area of hazardous industrial waste disposal enterprises // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 4. P. 105–114 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-105-114

5. Pyankov S.V., Maximovich N.G., Khayrulina E.A., Berezina O.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K. Monitoring acid mine drainage's effects on surface water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 satellite images // Mine Water Environ. 2021. V. 40. P. 606–621. doi: 10.1007/s10230-021-00761-7

6. Isgró M.A., Basallote M.D., Caballero I., Barbero L. Comparison of UAS and Sentinel-2 multispectral imagery for water quality monitoring: A case study for acid mine drainage affected areas (SW Spain) // Remote Sens. 2022. V. 14. No. 16. Article No. 4053. doi: 10.3390/rs14164053

7. Hanelli D., Barth A., Volkmer G., Köhler M. Modeling of acid mine drainage in open pit lakes using Sentinel-2 time-series: a case study from Lusatia, Germany // Minerals. 2023. V. 13. No. 2. Article No. 271. doi: 10.3390/min13020271

8. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Strochkov A. Comparison of *in situ* and remote-sensing methods to determine turbidity and concentration of suspended matter in the estuary zone of the Mzymta River, Black Sea // Remote Sens. 2021. V. 13. No. 1. Article No. 143. doi: 10.3390/rs13010143

9. Maksimovich N.G., Piankov S.V. The Kizel coal basin: environmental problems and solutions. Perm: Perm University Publ., 2018. 288 p. (in Russian).

10. Imaykin A.K., Imaykin K.K. Hydrogeological conditions of the Kizelovskiy coal-basin in time and after of its exploitation, prediction of their changes. Perm: Permskiy gosudarstvennyy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet, 2013. 112 p. (in Russian).

11. Maksimovich N.G., Khmurchik V.T., Berezina O.A., Demenev A.D. Migration of microelements

in river system in impact zone of acid mine water discharge in the Kizel Coal Basin // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2024. No. 2. P. 23–34 (in Russian). doi: 10.25018/0236\_1493\_2024\_2\_0\_23

12. Yanin E.P. Features of the impact on the environment of the development of coal deposits // Ekologicheskaya ekspertiza. Obzornaya informatsiya. 2019. V. 6. P. 2–59 (in Russian). doi: 10.36535/0869-1010-2019-06-1

13. Anderson J.E., Robbins E.I. Spectral reflectance and detection of iron-oxide precipitates associated with acidic mine drainage // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1998. V. 64. No. 12. P. 1201–1208.

14. Chen M., Li F., Tao M., Hu L., Shi Y., Liu Y. Distribution and ecological risks of heavy metals in river sediments and overlying water in typical mining areas of China // Mar. Pollut. Bull. 2019. V. 146. P. 893–899. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.07.029

15. Gammons C.H., Nimick D.A., Parker S.R. Diel cycling of trace elements in streams draining mineralized areas – a review // Appl. Geochem. 2015. V. 57. P. 34–44. doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.05.008.17

16. González-Toril E., Llobert-Brossa E., Casamayor E.O., Amann R., Amils R. Microbial ecology of an extreme acidic environment, the Tinto River // Appl. Environ. Microbiol. 2003. V. 69. No. 8. P. 4853–4865. doi: 10.1128/AEM.69.8.4853-4865.2003

17. 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) // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. V. 15. No. 2. P. 144–158 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-144-158

18. Demenev A.D., Berezina O.A., Maksimovich N.G., Mizev A.A. Applying remote sensing data to assess water quality in a mining area // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2024. V. 21. No. 2. P. 271–285 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-271-285