

Возможности организации долговременного дистанционного мониторинга крупных источников антропогенных загрязнений для оценки их влияния на окружающую среду

Е. А. Лупян¹, А. М. Константинова¹, А. В. Кашницкий¹, Д. М. Ермаков^{1,2},
В. П. Саворский², О. Ю. Панова², А. А. Бриль¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru*

² *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, 141190, Московская обл., Россия
E-mail: savor@inbox.ru*

Изучение влияния крупных источников антропогенных загрязнений (КИАЗ) на окружающую среду и организация мониторинга данного влияния представляется важной и актуальной задачей. В то же время в случае, когда требуется осуществлять контроль КИАЗ, которые могут оказывать влияние на значительные территории (сотни квадратных километров), решение этих задач практически невозможно без использования дистанционных, в первую очередь спутниковых, методов, позволяющих получать однородную объективную информацию о состоянии таких территорий. Огромная часть территорий, находящихся в зоне влияния КИАЗ в России, малонаселённая и труднодоступная, поэтому получение постоянной информации об их состоянии фактически невозможно без использования спутниковых наблюдений. В силу этого в последние годы начали активно развиваться методы и подходы, ориентированные на возможности организации дистанционного мониторинга регионов расположения КИАЗ для оценки их влияния на окружающую среду. Также активно разрабатывались методы организации обработки спутниковых данных, с использованием которых может быть организован постоянный мониторинг зон влияния КИАЗ на окружающую среду. Это в перспективе должно позволить организовывать автоматизированный долговременный дистанционный мониторинг КИАЗ. В настоящей работе представлены основные возможности организации такого мониторинга, описана созданная на основе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru>) экспериментальная система дистанционного мониторинга районов расположения различных КИАЗ и на примере комплексного анализа воздействия Качканарского горно-обогатительного комбината на окружающий его регион представлены возможности имеющихся подходов анализа спутниковых данных и созданной экспериментальной системы.

Ключевые слова: источники антропогенных загрязнений, техногенные отходы, отвалы, дистанционный мониторинг, растительные объекты, водные объекты, контрольные участки, спектральные индексы, центр коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг»

Одобрена к печати: 16.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213

Введение

Изучение влияния крупных источников антропогенных загрязнений (КИАЗ), включая источники техногенных отходов и отвалов (ИТОО), на окружающую среду и организация мониторинга данного влияния выступает важной и актуальной задачей. Данному вопросу посвящено значительное число работ, в том числе (Бузников, Тимофеев, 2010; Горный и др., 2013; Калабин и др., 2018; Титов и др., 2014; Cleugh et al., 2007; Krupa et al., 1990; Running et al., 2017). Для решения данных задач традиционно используются различные подходы. В то же время в случае, когда требуется осуществлять контроль КИАЗ, которые могут оказывать влияние на значительные территории (сотни квадратных километров), решение этих задач практически невозможно без использования дистанционных, в первую очередь спутниковых, методов, позволяющих получать однородную объективную информацию о состоянии таких территорий. Следует иметь в виду, что существенная часть территорий, находящихся в зоне влияния КИАЗ в России, малонаселённая и труднодоступная, поэтому получение

постоянной информации об их состоянии фактически невозможно без использования спутниковых наблюдений.

В силу этого в последние годы начали активно развиваться методы и подходы, ориентированные на возможности организации дистанционного мониторинга регионов расположения КИАЗ/ИТОО для оценки их влияния на окружающую среду (см., например, работы (Алексеев, 2008; Титов и др., 2014; Khudsar et al., 2004; Romanowska et al., 2002; Vassilev et al., 1998)). В работе (Саворский и др., 2019) был проведён анализ основных механизмов влияния типовых вредных выбросов КИАЗ на растительный покров и проанализированы возможные методы и подходы, позволяющие с использованием современных спутниковых систем дистанционного зондирования Земли выявить изменения в растительном покрове, вызываемые влиянием КИАЗ.

Также в настоящее время активно разрабатываются методы организации обработки спутниковых данных, с использованием которых может быть организован постоянный мониторинг зон влияния КИАЗ на окружающую среду. В частности, создана технология ведения спутникового объектного мониторинга, которая обеспечивает возможность автоматизированного формирования долговременных рядов данных, получаемых на основе спутниковых наблюдений по отдельным объектам (участкам), проведение их обработки и анализа (Константинова и др., 2021), и разработаны подходы для её применения при анализе состояния зон влияния ИТОО (Лупян и др., 2020). Это позволяет организовывать долговременный дистанционный мониторинг КИАЗ (включая ИТОО) для оценки их влияния на окружающую среду. В настоящей работе мы кратко представим основные возможности организации такого мониторинга на примере анализа состояния природных систем, примыкающих к Качканарскому горно-обогатительному комбинату (КГОК). В работе также будет кратко описана созданная на основе Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru>) (Лупян и др. 2019) экспериментальная система дистанционного мониторинга районов расположения различных КИАЗ на территории России.

Основные задачи, которые сегодня могут решаться на основе долговременного спутникового мониторинга за районами расположения КИАЗ

Традиционно к основным задачам мониторинга влияния КИАЗ на окружающую среду относятся поиск, выявление и оценка изменений, происходящих в атмосфере, водных ресурсах, ландшафте и растительном покрове в районах расположения таких объектов. При этом в конечном итоге при проведении мониторинга одной из основных задач становится оценка «зон влияния» объектов и выявление происходящих в них изменений в окружающей среде. В результате это должно вести к оценке ущерба, связанного с влиянием антропогенных объектов на окружающую среду. Поскольку зоны влияния КИАЗ могут занимать огромные территории, осуществлять их мониторинг, особенно долговременный, практически невозможно без использования современных систем и технологий спутникового мониторинга. В настоящем разделе мы остановимся на основных задачах, для которых, на наш взгляд, уже сегодня созданы достаточно проработанные методы и подходы.

Оценка изменений ландшафтов

Использование спутниковых данных для решения подобных задач представляется вполне традиционным (см., например, серию работ (Калабин и др., 2010, 2013, 2014, 2016, 2018)). В приложении к анализу изменений, происходящих в районах расположения ИТОО, данные задачи в основном направлены на анализ динамики ИТОО и обеспечивающей ИТОО инфраструктуры. С учётом того, что в настоящее время имеются долговременные (почти со-рокалетние) достаточно однородные ряды данных спутников серии Landsat (<https://www.usgs>.

gov/landsat-missions), а с 2013 г. к ним добавились и данные спутников серии Sentinel-1, -2 (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>), возможно ведение как ретроспективных изменений в изучаемых зонах, так и текущих изменений. Поэтому работы, направленные на создание методов мониторинга изменений ландшафтов на основе данных дистанционных наблюдений в районах расположения ИТОО, ведутся в последние годы довольно активно, в том числе и в нашей стране. К таким работам, в частности, можно отнести (Горный и др., 2019; Григорьева и др., 2018; Калабин и др., 2010, 2013, 2014, 2016, 2018; Крицук и др., 2013). Также активно развиваются различные методы картографирования растительного покрова (см., например, работу (Барталев и др., 2016)), которые в том числе позволяют выделять крупномасштабные долговременные изменения растительного покрова, связанные с влиянием КИАЗ.

Оценка постоянных воздействий на атмосферу

Развитие подходов прямых оценок загрязнения атмосферы в районах расположения КИАЗ с использованием данных дистанционного мониторинга в последние годы во многом ориентировано на использование спутниковых систем, обеспечивающих оценку малых газовых составляющих. Такие системы активно создаются и разрабатываются в последние десятилетия. Естественно, что наибольший интерес тут представляют современные, надёжно действующие системы, обеспечивающие доступ к данным для широкого круга пользователей. К таким системам сегодня в первую очередь можно отнести приборы OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) (спутник Aura) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), TROPOMI (*англ.* TROPospheric Monitoring Instrument) (спутник Sentinel-5P) (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>). На основе данных этих приборов сегодня получается значительное число информационных продуктов по концентрации малых газовых составляющих на всей территории Земли (Follette-Cook, Gupta, 2018). Действующие в настоящее время спутниковые системы позволяют фактически ежедневно получать информацию о различных малых газовых составляющих в различных районах, в том числе и в районах расположения КИАЗ. Это даёт возможность формировать различные усреднённые по времени измерения в этих районах, анализируя их особенности, распределение (включая приуроченность к возможным источникам). Такая информация может, в частности, использоваться для выделения районов и зон, в которых может происходить/ождаться существенное воздействие КИАЗ на окружающую среду.

Оценка состояния и изменений водных объектов

В настоящее время существует большое число подходов к оценке состояния и изменений водных объектов в зависимости от их характеристик и пространственно-временных масштабов. При этом наиболее эффективным и перспективным видится использование связи между типом и/или интенсивностью загрязняющего воздействия со спектральными особенностями водных объектов, представляемые в виде полуэмпирических индексов, рассчитываемых, как правило, по измерениям в достаточно широких спектральных каналах видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного (ИК) диапазонов.

Начало развития таких подходов положено работами (Gao, 1995; McFeeters, 1996), в которых введены простейшие водные индексы (по аналогии с NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс)) для локализации на многоканальных спутниковых изображениях объектов гидрологической сети. В дальнейшем были приложены значительные усилия по совершенствованию водных индексов, в том числе путём дополнительного учёта природных и техногенных особенностей объектов и их состояния (Feyisa et al., 2014; Fisher et al., 2016; Xu, 2006; Zhang et al., 2017). Значительная часть таких индексов может служить индикаторами загрязнённости водных объектов (ЗО). Также получили развитие более специализированные индексы, направленные на анализ «качества» воды гидрологических объектов суши. Так, предложенный индекс мутности (*англ.*

turbidity water index) (Feng et al., 2012) показывает положительные корреляции с концентрацией взвеси (прежде всего минеральной) в толще воды. Более избирательной чувствительностью к отдельным компонентам химического состава минеральной взвеси характеризуется ряд дополнительных индексов, предложенных в работах (Березина и др., 2018; Mustafa et al., 2017). Отдельным направлением исследований стало развитие индексов, помогающих определить содержание в воде различных микроорганизмов (например, в работах (Hu, 2009; Hu et al., 2021)). Быстрое размножение (или вымирание) последних также может рассматриваться в качестве прямой или косвенной характеристики воздействия техногенного загрязнения на окружающую среду. Примеры различных водных индексов приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Примеры различных спектральных водных индексов

Водные индексы	Название и основная область применения	Алгоритм вычисления	Источник
AWEI	<i>англ.</i> Automated Water Extraction Index — автоматизированный индекс выделения воды	$4(\text{GREEN} - \text{SWIR1}) - (0,25\text{NIR} + 2,75\text{SWIR2})$	(Feyisa et al., 2014)
NDMI	<i>англ.</i> Normalized Difference Moisture — стандартизованный индекс различий увлажнённости	$(-\text{SWIR1})/(\text{NIR} + \text{SWIR1})$	(Zhang et al., 2016)
NDWI	<i>англ.</i> Normalised Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс	$(\text{GREEN} - \text{NIR})/(\text{GREEN} + \text{NIR})$	(McFeeters, 1996)
MNDWI	<i>англ.</i> Modification of Normalised Difference Water Index — модифицированный нормализованный разностный водный индекс	$(\text{GREEN} - \text{SWIR1})/(\text{GREEN} + \text{SWIR1})$	(Xu, 2006)
WRI	<i>англ.</i> Water Ratio Index — водный индекс	$(\text{GREEN} + \text{RED})/(\text{NIR} + \text{SWIR1})$	http://dx.doi.org/10.1109/geoinformatics.2010.5567762
NDTI	<i>англ.</i> Normalized Difference Turbidity Index — нормализованный разностный индекс мутности	$(\text{RED} - \text{GREEN})/(\text{RED} + \text{GREEN})$	https://developers.arcgis.com/python/sample-notebooks/river-turbidity-estimation-using-sentinel2-data-/

Примечание: Green — зелёный, Red — красный, SWIR — *англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный, NIR — *англ.* near infrared, ближний инфракрасный.

Работы по комплексному анализу дистанционных водных индексов в сочетании с данными *in situ* (Ермаков и др., 2021; Лупян и др., 2020; Hu et al., 2021) в целом показывают высокий потенциал развитых дистанционных технологий для создания системы мониторинга экологического состояния водных объектов и, в частности, детектирования и анализа воздействия на них различного рода техногенных загрязнений. Разработка и внедрение такого рода систем активно ведётся за рубежом, например в США (Pahlevan et al., 2018), странах Евросоюза (Papathanaopoulou, Simis, 2019), Китае (Wang, Yang, 2019) и ряде других государств.

Оценка изменений растительного покрова

Естественно, что одним из основных индикаторов КИАЗ становятся изменения растительного покрова в зонах их расположения. Следует отметить, что в последние годы активно развиваются различные спутниковые методы, обеспечивающие мониторинг и оценку состояния растительности (см., например, работы (Барталев и др., 2016)). Вопросы оценки состояния растительного покрова в зонах КИАЗ также рассматриваются в различных работах (Горный и др., 2011, 2013, 2019; Gornyy et al., 2010). В исследовании (Саворский и др., 2019) достаточно

подробно рассмотрены вопросы, связанные с особенностями влияния разных антропогенных факторов на растительный покров и возможности их оценки с использованием информации современных спутниковых систем. Особо следует отметить, что влияние антропогенных объектов на состояние растительного покрова в большинстве случаев носит кумулятивный характер, при котором изменения, связанные с загрязнениями от КИАЗ, проявляют себя не мгновенно, а по мере накопления негативных воздействий на растительный покров. При этом могут наблюдаться не только резкие (явные) изменения и даже смена типа растительного покрова, но и постепенная деградация отдельных его участков. Возможности построения систем дистанционного контроля таких изменений, в частности, рассматривались в работах (Лупян и др., 2020; Саворский и др., 2019). Следует также отметить, что в настоящее время уже накоплены значительные архивы спутниковых данных, глубина которых исчисляется десятилетиями. Всё это позволяет не только вести оперативный дистанционный мониторинг районов потенциальных загрязнений крупными промышленными объектами, но и анализировать возникающие в них долговременные изменения состояния окружающей среды, в первую очередь растительного покрова.

Таким образом, мы видим, что в настоящее время имеется значительное число различных подходов к использованию возможностей спутникового мониторинга для оценки состояния окружающей среды в районах расположения КИАЗ.

Возможности организации системы работы со спутниковыми данными для проведения анализа состояния окружающей среды в зонах расположения КИАЗ

Основные задачи подобной системы заключаются в организации возможности работы с различной информацией, необходимой для проведения анализа состояния окружающей среды в районах расположения КИАЗ. Эти задачи достаточно подробно рассмотрены в работах (Константинова и др., 2021; Лупян и др., 2020). В них также рассмотрены возможности созданной в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) системы для решения данных задач. Система обеспечивает работу с долговременными, постоянно пополняющимися архивами спутниковых данных и результатов их обработки, которые необходимы для решения задач, рассмотренных в предыдущем разделе, расчёт различных характеристик, требуемых для проведения анализа состояния окружающей среды и отдельных объектов в районе расположения ИТОО, предоставление инструментов для проведения такого анализа. В целом созданная система рассчитана на проведение комплексного анализа состояния зон расположения КИАЗ. Пример такого анализа представлен в следующем разделе настоящей работы.

Пример проведения комплексного анализа на основе данных спутниковых наблюдений влияния Качканарского горно-обогатительного комбината (КГОК) на состояние окружающей среды в районе его расположения

Особенности наблюдаемого объекта и района его расположения

Разведка и промышленная разработка месторождений Качканарской группы начата в середине XX в. Главные месторождения: Гусевогорское (разработки ведутся с 1963 г.) и Собственно-Качканарское (с 2020 г.). Разработку проводит Качканарский горно-обогатительный комбинат группы ЕВРАЗ (ЕВРАЗ КГОК, <https://www.evraz.com/ru/company/assets/evraz-kgok/>), входящий в пятёрку крупнейших в России горнорудных предприятий. Производственная мощность комбината составляет порядка 55 млн т железной руды в год. Добыча руды ведётся открытым способом с применением буровзрывных работ. Расположение объектов КГОК по состоянию на 20.08.2021 (данные спутника Sentinel-2) представлено на *рис. 1* (см. с. 198).

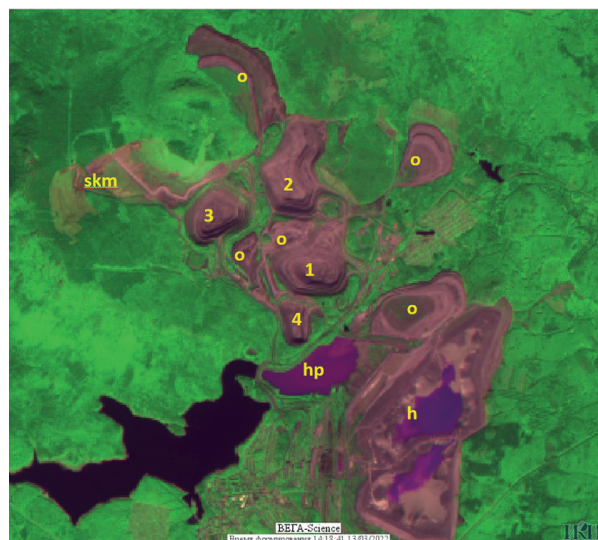


Рис. 1. Объекты КГОК: **o** — отвалы; **h** — хвостохранилище; **hp** — шламовый пруд. Номерами указаны карьеры Гусевгорского месторождения: **1** — «Главный»; **2** — «Северный»; **3** — «Западный»; **4** — «Южная залежь»; **skm** — район разработки Собственно-Качканарского месторождения (СКМ)

КГОК — основной источник выбросов в атмосферу среди всех предприятий Северного управленческого округа Свердловской обл. (СУО СО) (Государственный..., 2016, 2021). Доля атмосферных выбросов КГОК по округу превышает 25 %, а по всей Свердловской области она составляет более 10 %. При этом следует учитывать, что в СУО СО КГОК — одно из наиболее крупных предприятий. Также следует отметить, что по крайней мере за последние 6 лет (с 2015 г.) общий объём его атмосферных выбросов существенно не изменился: в 2015 г. он составил 86,3 тыс. т (Государственный..., 2016), а в 2020 г. — 81,1 тыс. т (Государственный..., 2021).

По данным Государственного доклада о санитарно-эпидемиологической обстановке (Государственный..., 2016), в Качканарском городском округе в 2015 г. был проведён лабораторный контроль состояния почвы жилой зоны города на содержание металлов в 9 точках, равномерно распределённых на территории города, а также в контрольной точке в загородном секторе. Исследования почвы проводились на наличие таких соединений, как медь, никель, цинк, кобальт, кадмий, марганец, ванадий, свинец, хром, ртуть, вольфрам, мышьяк. Превышения предельно-допустимых норм не было обнаружено ни по одному из исследованных показателей. Уровень загрязнения почвы согласно принятой классификации во всех точках отбора характеризуется как «ниже низкого» (Государственный..., 2016). Эти исследования подтверждаются и данными за 2020 г. (Государственный..., 2021), за исключением неудовлетворительных результатов лабораторных исследований почвы по микробиологическим показателям.

Основным загрязняющим фактором, формируемым функционированием КГОК, оказывается пыль, образующаяся в процессе дробления железорудного сырья. Однако благодаря низкому содержанию вредных примесей (серы и фосфора) токсичность пыли относительно невысокая. Поэтому, хотя при этом и повышается риск отрицательного влияния на здоровье населения, он не становится критическим (Абраменко, 2019).

Изменения ландшафта в районе расположения КГОК в период с 1987 по 2021 г.

В настоящее время по району расположения КГОК имеются архивы данных спутников Landsat и Sentinel-2 за период с 1987 г. по настоящее время. Это позволяет оценить динамику развития различных объектов комбината, которая показана на рис. 2 (см. с. 199). По представленным данным также проведена оценка площадей различных объектов КГОК

(см. *рис. 1*). Результаты оценки, приведённые в *табл. 2*, показывают, в частности, что общая площадь всех объектов КГОК увеличилась почти в 1,5 раза за период с 1987 по 2021 г.

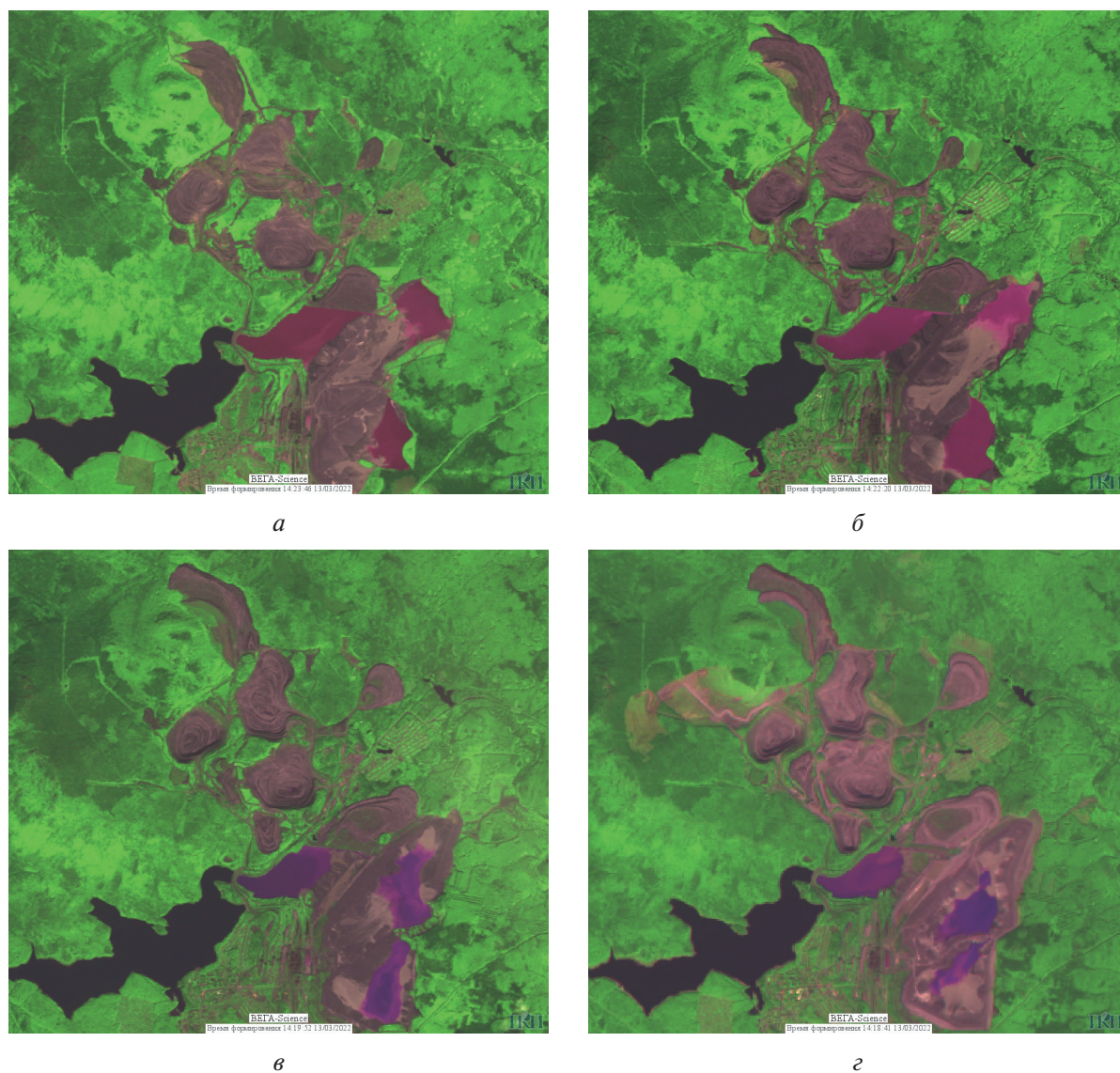


Рис. 2. Динамика КГОК: *а* — июнь 1987 г. (Landsat-5); *б* — август 1997 г. (Landsat-5); *в* — август 2009 г. (Landsat-5); *г* — август 2021 г. (Sentinel-2)

Таблица 2. Изменения площади различных объектов КГОК

Год	Площадь хвостохранилища, га	Площадь зеркала шламового пруда, га	Суммарная площадь отвалов, га	Суммарная площадь карьеров, га	Площадь зоны разработки СКМ, га	Общая площадь всех объектов КГОК, га
1987	1175	270	435	655	—	2540
1997	1325	250	585	690	—	2875
2009	1340	200	640	690	—	2945
2021	1395	195	760	725	580	3741

Это означает, что по мере развития КГОК увеличиваются площади объектов, непокрытые растительностью, что фактически отражает монотонное увеличение мощности основного загрязняющего фактора, формируемого КГОК, а именно выброса пыли.

Анализ особенностей выбросов наблюдаемого объекта в атмосферу

Как уже отмечалось в разделе, описывающем особенности функционирования КГОК, в целом данный объект декларируется достаточно чистым. Основное воздействие его на окружающую среду связано с выбросами пыли от карьеров и ГОК. Спутниковые наблюдения, полученные прибором TROPOMI спутника Sentinel-5P (Copernicus..., 2018, 2021a, b) в целом подтверждают такую оценку объекта. Анализ распределения среднегодовой концентрации диоксида азота (рис. 3), который в значительной степени характеризует наличие антропогенных загрязнений в окрестности КГОК, показывает, что эти концентрации здесь гораздо ниже, чем, например, такие же показатели атмосферных загрязнений в крупных промышленных районах Перми или Екатеринбурга. Отметим также тот факт, что на средних за 2021 г. данных для значений аэрозольного индекса, которые получены по информации прибора TROPOMI, значимых отклонений от фона в районе КГОК не обнаружено. Это в целом согласуется с вышеупомянутыми данными Государственных докладов 2016 и 2021 гг., в которых утверждается, что выбросы КГОК в атмосферу составляют порядка 10 %.

В то же время анализ пространственного распределения среднесезонных значений диоксида азота в районе КГОК позволяет качественно оценить зону и преимущественное направление разноса различных загрязнений (в первую очередь пыли). Для проведения такой качественной оценки могут быть использованы диаграммы, приведённые на рис. 4 (см. с. 201). Из представленных данных видно, что концентрация диоксида азота достаточно быстро падает по мере удаления от КГОК. Загрязнения, в основном, распространяются в восточном и юго-восточном направлениях. В этих же направлениях следует ожидать и основное распространение пыли от объектов КГОК. Отметим, что оценка территорий, на которые распространяются выбросы пыли от объектов, может быть проведена также на основе анализа зоны раннего схода снежного покрова (рис. 5, см. с. 201). На рис. 5 хорошо видно, что зона раннего схода снежного покрова находится в восточном и юго-восточном направлениях, что соответствует данным, приведённым на рис. 4.

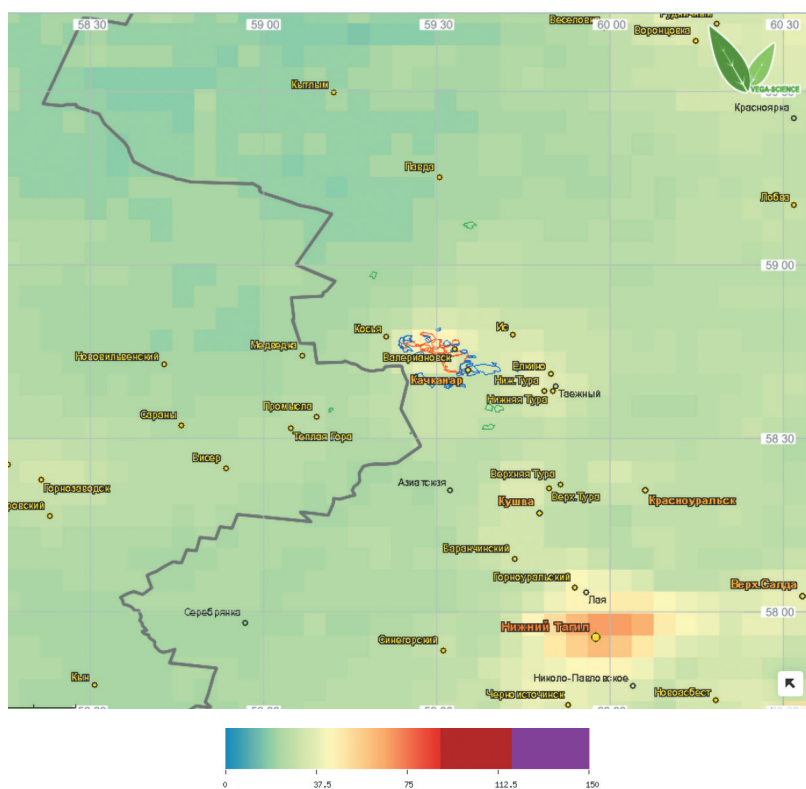


Рис. 3. Распределение среднегодовой концентрации двуокиси азота за 2021 г., полученное по данным прибора TROPOMI, установленного на спутнике Sentinel-5P (Copernicus..., 2018, 2021a, b)

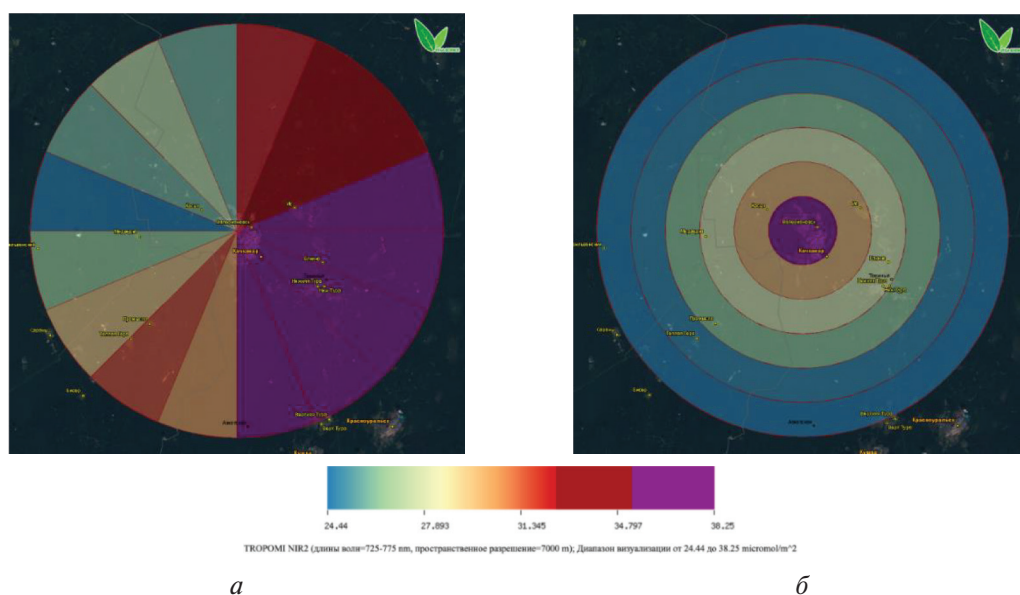


Рис. 4. Распределение средней концентрации диоксида азота за 2021 г. по данным прибора TROPOMI (Sentinel-5P) (Copernicus..., 2018, 2021a, 2021b) по зонам по различным направлениям (а) и различной удалённости от КГОК (б)

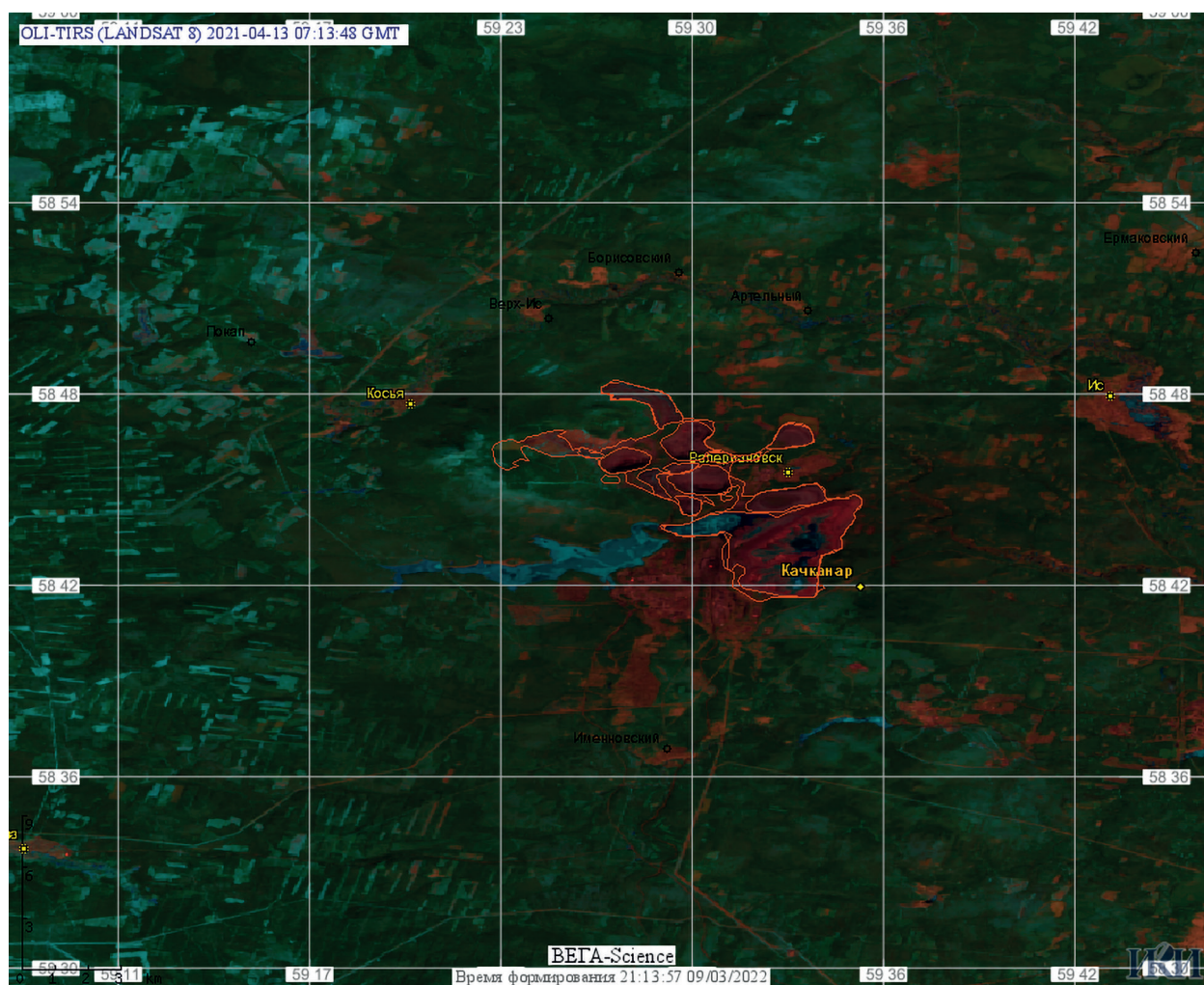


Рис. 5. Зона КГОК по данным спутника Landsat. Цветосинтез: Red (красный) — канал 2110–2290 нм, Green (зелёный) — 850–880 нм, Blue (голубой) (640–670 нм); 13.04.2021. Участки, с которых сошёл снег (красные), расположены в основном восточнее КГОК

Анализ состояния водных объектов в окрестности ИТОО

Для анализа состояния «загрязнённых» водных объектов (ВО), находящихся на территории водно-шламового хозяйства КГОК (рис. 6), рассмотрим значения спектральных водных индексов для хвостохранилища (S1) и шламового пруда (S2). В качестве водных «чистых» объектов (ЧО) для проведения сравнения были выбраны Нижне-Выйское вдхр. (сS1), расположенное на р. Вые, предназначенное для снабжения КГОК и являющееся резервным источником питьевого водоснабжения г. Качканар, а также пруд (сS2), расположенный за территорией КГОК.

Анализ спутниковых наблюдений, полученных в различные годы по этим объектам, показывает, что они достаточно стабильны. При этом состояние ЗО даже визуально отличается от состояния ЧО. Это хорошо видно на рис. 6: в основном ЗО отличается от ЧО уровнем мутности, связанный с находящейся в них взвеси, поступающей после слива воды с обогатительной фабрики. А также на графиках годового хода среднемесячных значений индекса мутности NDTI (см. табл. 1), восстановленных по данным спутника Landsat-8 период с 2013 по 2021 г. (рис. 7, см. с. 203). Хорошо видно, что в летние месяцы, когда водоёмы полностью свободны ото льда, значения NDTI ЧО значительно выше, чем значения в ЗО, при этом в шламовом пруду (ЗО S2) значения NDTI выше, чем в хвостохранилище, в которое непосредственно осуществляется сброс с обогатительной фабрики. Проведённый анализ также показал, что усреднённые значения NDTI в различные годы довольно стабильны. Это может свидетельствовать о достаточно устойчивом технологическом цикле обогатительной фабрики.



Рис. 6. Водные объекты, на которых выбирались анализируемые участки: загрязнённые S1, S2 — водные объекты, расположенные на территории водно-шламового хозяйства КГОК; чистые cS1, cS2 — водные объекты вблизи КГОК

Отметим, что в ряде работ делалась попытка найти связь между различными водными индексами и химическим составом водных объектов. Так, в исследовании (Mustafa et al., 2017) были получены зависимости кислотности (в единицах pH) и концентрации (в $\text{мг}\cdot\text{дм}^{-3}$) хлоридов, $\text{Cl}(-)$, сульфатов, $\text{SO}_4(2-)$, натрия, Na, и калия, K, от значений стандартных водных

индексов NDWI, NDMI, WRI, AWEI и MNDWI (см. табл. 1). В работе были получены следующие формулы для этих зависимостей и коэффициенты детерминации:

$$\begin{aligned} \text{pH} &= 8,396 + 2,622\text{NDWI} - 4,295\text{NDMI} \quad (R^2 = 0,752), \\ \text{Cl}(-) &= 144,82 + 25,024\text{WRI} + 44,690\text{AWEI} - 78,621\text{MNDWI} \quad (R^2 = 0,918), \\ \text{SO}_4(2-) &= 333,78 + 15,013\text{WRI} - 102,857\text{AWEI} + 233,35\text{MNDWI} \quad (R^2 = 0,982), \\ \text{Na} &= 143,29 - 4,819\text{AWEI} + 4,908\text{MNDWI} \quad (R^2 = 0,915), \\ \text{K} &= 3,053 - 2,068\text{AWEI} + 3,365\text{MNDWI} \quad (R^2 = 0,820). \end{aligned}$$

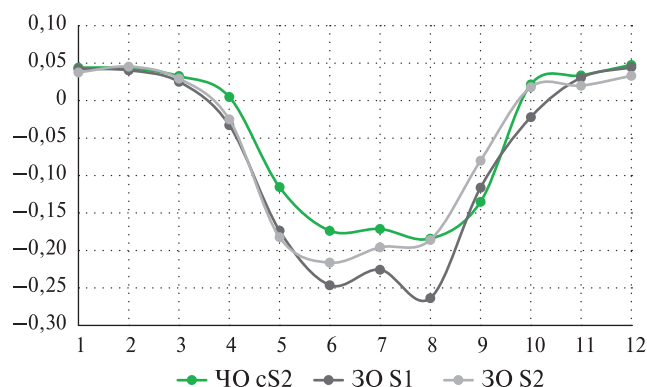


Рис. 7. Ход индекса мутности NDTI водоёмов с различным уровнем загрязнения

Конечно, следует учитывать, что данные зависимости могут меняться при анализе разных территорий и типов водных объектов. Поэтому для получения количественных оценок химического состава водных объектов, безусловно, требуется региональная верификация предложенных моделей. В то же время в силу больших коэффициентов детерминации этих моделей, видимо, их можно использовать достаточно широко для проведения качественных оценок состояния водоёмов. Поэтому нами был проведён расчёт обсуждаемых характеристик по наблюдению участков различных водных объектов. В табл. 3 приведены средние значения этих характеристик за период 2018–2020 гг., полученные по бесснежным наблюдениям (в условиях отсутствия ледового покрова на изучаемых участках).

Таблица 3. Сравнение показателей химического состава исследуемых водных объектов

Показатели химического состава	сS1	сS2	S1	S2
Хлориды, Cl(–), мг/дм ³	198,6	179,1	290,3	245,5
Сульфаты, SO ₄ (2–), мг/дм ³	550,7	279,9	597,2	566,4
Натрий, Na(+), мг/дм ³	146,5	145,6	145,1	145,4
Калий, K(+), мг/дм ³	5,4	4,8	5,0	5,1
Водородный показатель, pH, усл. ед.	8,7	9,0	8,2	8,2

Видно, что фактически по всем показателям, кроме хлоридов, не наблюдается принципиального устойчивого различия между 3О и ЧО. Кроме того, согласно СанПиН 2.1.5.980-00 «Водоотведение населённых мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы» водородный показатель (pH) не должен выходить за пределы 6,5–8,5 усл. ед.; минерализация воды — не более 1000 мг/дм³, в том числе хлоридов — 350 мг/дм³, сульфатов — 500 мг/дм³. То есть фактически на всех анализируемых участках показатели с точностью до возможных ошибок лежат в рамках установленных норм.

Анализ состояния и изменения растительного покрова в районе расположения наблюдаемого объекта

Оценка долговременного влияния КГОК на растительный покров региона может быть проведена на основе сравнения данных спутниковых наблюдений в различные годы. Одним из инструментов такого сравнения становятся синтезы разновременных спутниковых данных. Такой синтез для района КГОК представлен на *рис. 8*, на котором хорошо видно, что каких-то крупномасштабных резких изменений растительного покрова, которые могли бы быть однозначно связаны с влиянием КГОК, в регионе не наблюдается. За исследуемый период в регионе, безусловно, происходили масштабные изменения растительного покрова, в первую очередь лесов, но связаны эти изменения были в основном с вырубкой лесов.

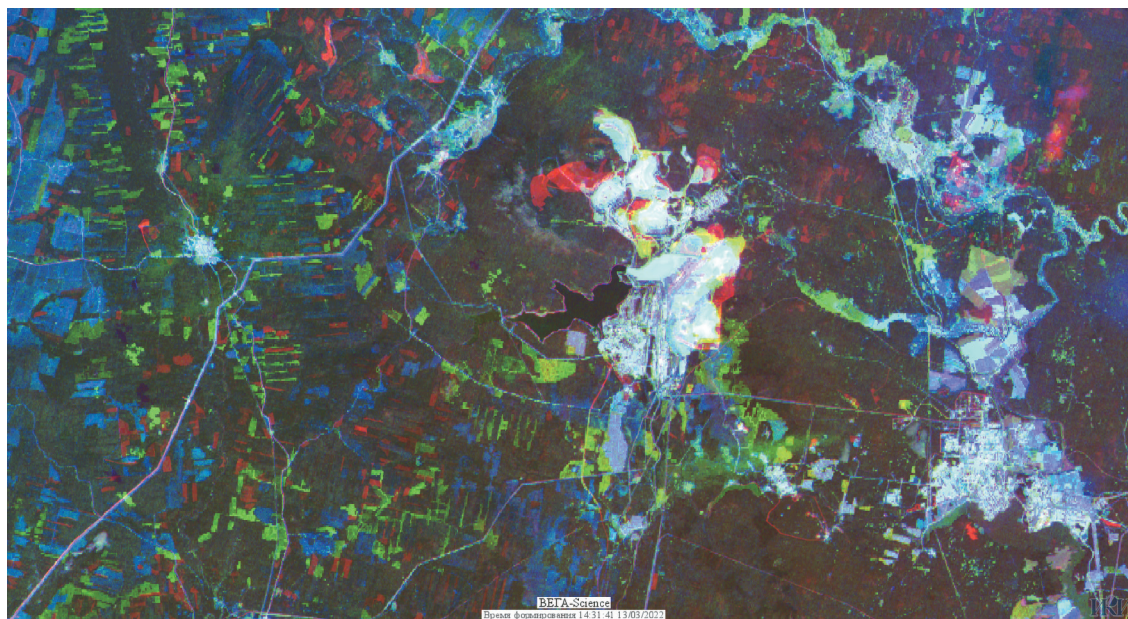


Рис. 8. Разновременной синтез каналов 650 мкм спутников Landsat-5 и Sentinel-2. Red — 2021 г., Green — 1997 г., Blue — 1987 г. Голубые участки — в основном рубки до 1987 г., зелёные — в основном рубки периода 1987–1997 гг., красные — в основном рубки периода 1997–2021 гг.

В то же время отдельные участки территорий, в том числе покрытые лесом, безусловно, подвергались влиянию КГОК. Оценку такого влияния можно осуществить, проводя сравнение динамики развития растительности на загрязнённых и незагрязнённых участках. Ниже мы приведём пример проведения такого анализа. Для его выполнения был сделан выбор достаточно однородных участков леса на чистых и потенциально загрязнённых территориях. Выбор таких однородных участков осуществлялся на основе целого ряда тематических карт, сформированных и постоянно обновляемых в ИКИ РАН с использованием методов, подходов и технологий, подробно описанных, в частности, в работах (Барталев и др., 2015, 2016).

Для проведения анализа в том числе были выбраны однородные участки с преобладанием берёзы и сосны, расположенные вблизи объектов КГОК (в 20–30 км), которые можно считать потенциально загрязнёнными и потенциально чистыми. При этом выбирались участки с различными типами растительного покрова. Для участков на основе данных прибора MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) были рассчитаны временные ряды NDVI, которые представлены на *рис. 9* и *10* (см. с. 205). Видно, что детальное сравнение поведения чистых и загрязнённых участков позволяет наблюдать долговременные тренды уменьшения NDVI на загрязнённых участках. Зависимости таких изменений (разницы NDVI на чистых и загрязнённых участках в максимуме вегетационного периода) от времени приведены также на *рис. 11* и *12* (см. с. 205). Регрессионные Δ NDVI для чистых и грязных участков представлены выражениями (1) (для берёзы) и (2) (для сосны):

$$\Delta \text{NDVI} = \text{NDVI}_q - \text{NDVI}_r = 0,0018(\text{год} - 2001) + 0,0091; R^2 = 0,61, \quad (1)$$

$$\Delta \text{NDVI} = \text{NDVI}_q - \text{NDVI}_r = 0,0034(\text{год} - 2001) - 0,001; R^2 = 0,66. \quad (2)$$

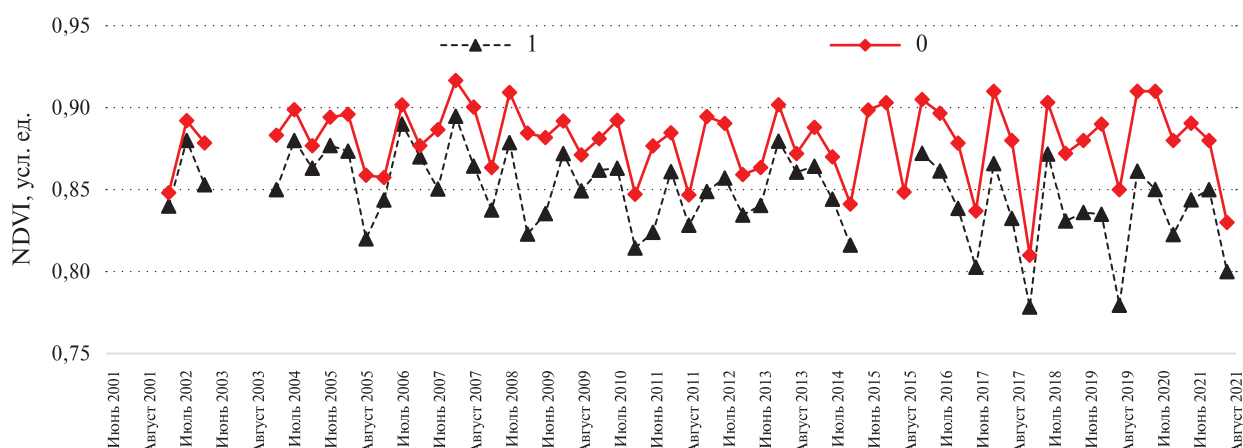


Рис. 9. Многолетние ряды среднемесячных NDVI однородных участков берёзы в окрестности КГОК: 0 — чистые участки, 1 — загрязнённые

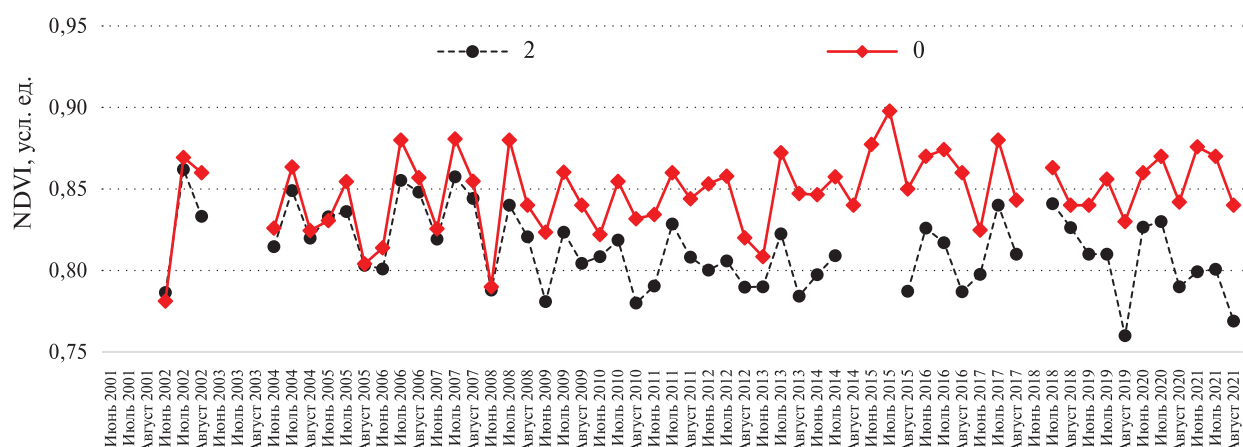


Рис. 10. Многолетние ряды среднемесячных NDVI однородных участков сосны в окрестности КГОК: 0 — чистые участки, 1 — загрязнённые

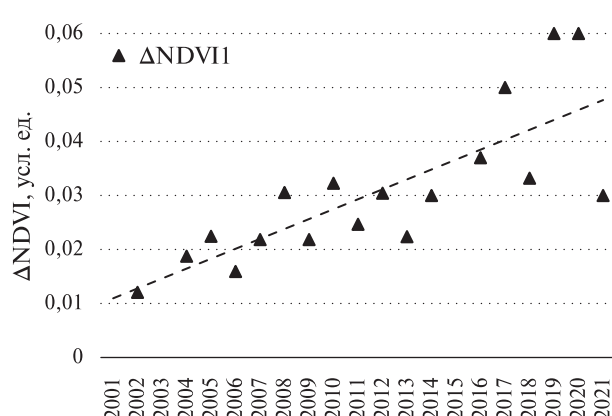


Рис. 11. Многолетние ряды контрастов среднемесячных ΔNDVI контролируемого и эталонного участков берёзы в окрестности Качканарского ИТОО на максимуме вегетационного периода (июль). Аппаратура MODIS (Terra/Aqua)

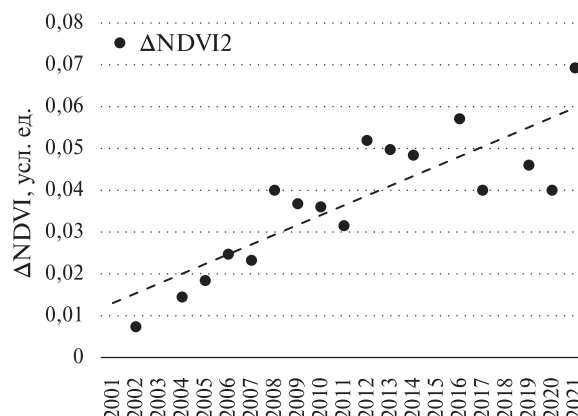


Рис. 12. Многолетние ряды контрастов среднемесячных ΔNDVI контролируемого (участок 2) и эталонного участков сосны в окрестности Качканарского ИТОО на максимуме вегетационного периода (июль). Аппаратура MODIS (Terra/Aqua)

Таким образом, видно, что в настоящее время спутниковые технологии позволяют не только выявить резкие изменения в растительном покрове, которые могут создавать КИАЗ, но и оценить слабые долговременные изменения, происходящие от воздействия КИАЗ на растительный покров. В перспективе эти возможности могут позволить проводить детальный анализ влияния КИАЗ на окружающую среду в районе их расположения, выявлять и оценивать долговременный ущерб различным экосистемам региона.

Экспериментальная система дистанционного мониторинга районов расположения КИАЗ на территории России

С учётом описанных выше возможностей на основе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) и входящей в неё уникальной научной установки «Vega-Science» (<http://sci-vega.ru>) (Лупян и др., 2021; Loupian et al., 2022) была создана экспериментальная система постоянного дистанционного мониторинга районов расположения КИАЗ на территории России. Система обеспечивает возможность анализа информации, полученной на основе спутниковых данных по различным объектам в зонах потенциального влияния ИТОО. Она позволяет анализировать как архивную, так и оперативную информацию по таким объектам. В настоящее время ведётся постоянный мониторинг 60 районов, в которых расположены ИТОО различных типов (табл. 4). Распределение данных районов представлено на рис. 13.

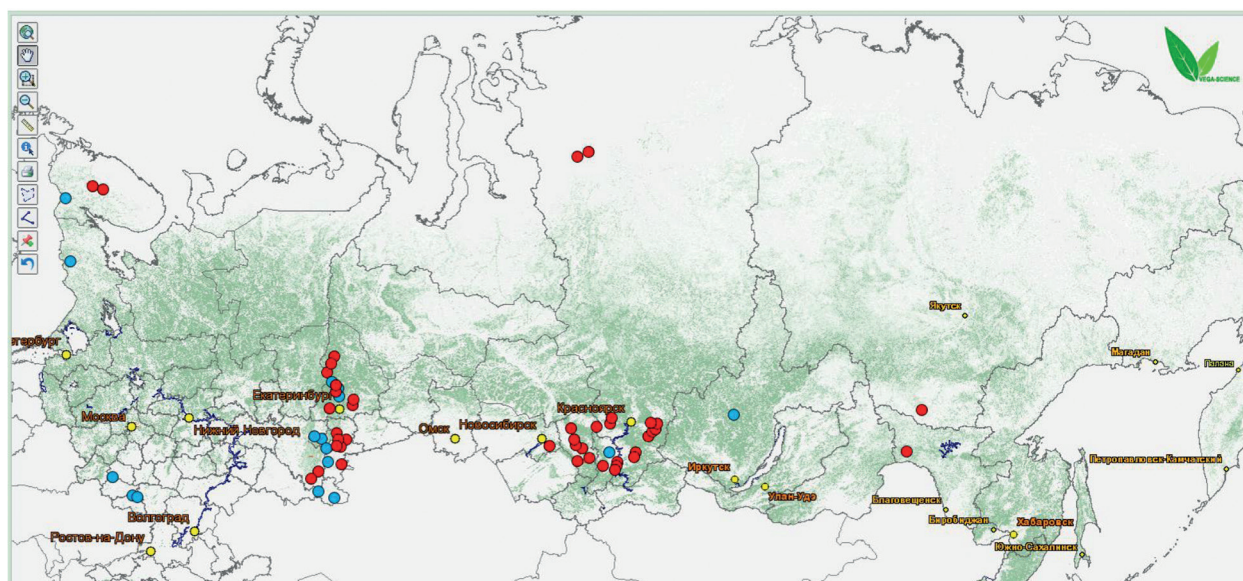


Рис. 13. Карта распределения КИАЗ, за которыми ведётся наблюдение в рамках созданной экспериментальной системы. Красный цвет — добыча природных ископаемых, голубой — добыча и обогащение природных ископаемых

Таблица 4. Типы КИАЗ, за которыми ведётся наблюдение в рамках созданной экспериментальной системы дистанционного мониторинга

Тип	Количество ИТОО
1. Добыча железных руд, обогащение	18
2. Добыча медных руд, обогащение	14
3. Добыча угля	21
Остальное	7
Итого	60

Заключение

Представленные в работе результаты показывают, что разработанные в настоящее время методы, подходы и технологии анализа данных спутникового наблюдения Земли позволяют проводить комплексное исследование изменений, происходящих в зонах расположения КИАЗ, и выявлять различные аспекты их влияния на состояние окружающей среды. При этом в ближайшей перспективе может быть разработан достаточно стандартизированный подход к анализу данных, получаемых по районам расположения КИАЗ, который позволит вести комплексное изучение спутниковой информации, связанной с различными направлениями такого влияния. Прототипом данного подхода может быть в том числе комплексный анализ, представленный в настоящей работе по району КГОК. Важно также отметить, что кратко описанная в работе экспериментальная система дистанционного мониторинга районов расположения КИАЗ на территории России уже сегодня может использоваться для анализа состояния различных территорий страны.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-24121мк) с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

Литература

1. *Абраменко А. В.* Комплексная характеристика состояния природной среды городского округа Качканар Свердловской области и ее изучение во внеурочной деятельности с обучающимися: Выпускная квалификационная работа. Екатеринбург: УГПУ, 2019. 57 с.
2. *Алексеев Ю. В.* Тяжелые металлы в агроландшафте: научно-практич. пособие. СПб.: ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
3. *Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А.* Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
4. *Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
5. *Березина О. А., Шихов А. Н., Абдуллин Р. К.* Применение многолетних рядов данных космической съёмки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 144–158.
6. *Бузников А. А., Тимофеев А. А.* Региональный экологический мониторинг: метод и аппаратно-программный комплекс для дистанционной оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжёлыми металлами // Региональная экология. 2010. № 3(29). С. 9–17.
7. *Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш.* Термодинамический подход для дистанционного картографирования нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194.
8. *Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Храмов В. Н.* Верификация крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 201–212.
9. *Горный В. И., Киселев А. В., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А.* Термодинамический подход к спутниковому картированию накопленного экологического ущерба лесных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 124–136. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-124-136.
10. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2015 году» / М-во природных ресурсов и экологии Свердловской обл. Екатеринбург, 2016. 312 с.
11. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2020 году» / М-во природных ресурсов и экологии Свердловской обл. Екатеринбург, 2021. 329 с.
12. *Григорьева О. В., Дроздова И. В., Шилин Б. В.* Экспериментальное обоснование возможностей видеоспектральной дистанционной индикации кратковременного стресса растительности

- // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 78–88. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-78-88.
13. Ермаков Д. М., Деменев А. Д., Мещерякова О. Ю., Березина О. А. Особенности разработки регионального водного индекса для мониторинга воздействия изливов кислых шахтных вод на речные системы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 222–237. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-222-237.
 14. Калабин Г. В., Евдокимова Г. А., Горный В. И. Оценка динамики растительного покрова нарушенных территорий в процессе снижения воздействия комбината «Североникель» на окружающую среду // Горный журн. 2010. № 2. С. 74–77.
 15. Калабин Г. В., Моисеенко Т. И., Горный В. И., Крицук С. Г., Соромотин А. В. Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению золоторудного месторождения «Олимпиада», обрабатываемого открытым способом // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 1. С. 177–184.
 16. Калабин Г. В., Горный В. И., Крицук С. Г. Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению Сорского медно-молибденового месторождения // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 1. С. 153–161.
 17. Калабин Г. В., Горный В. И., Крицук С. Г. Оценка состояния окружающей среды территории Качканарского ГОКа по данным спутникового мониторинга // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 2. С. 179–187.
 18. Калабин Г. В., Горный В. И., Давидан Т. А., Крицук С. Г., Тронин А. А. Реакция тундровой экосистемы на снятие техногенной нагрузки со стороны рудника «Валькумей» // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 146–153.
 19. Константинова А. М., Балашов И. В., Кашицкий А. В., Лупян Е. А. Унифицированная технология дистанционного мониторинга природных и антропогенных объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 41–52. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52.
 20. Крицук С. Г., Горный В. И., Калабин Г. В., Латыпов И. Ш. Закономерности сезонных циклов вегетационного индекса экосистем в районе Сорского горно-металлургического комплекса // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 228–237.
 21. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашицкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
 22. Лупян Е. А., Константинова А. М., Балашов И. В., Кашицкий 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.
 23. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашицкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Бриль А. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Миклашевич Т. С., Плотников Д. Е., Радченко М. В., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А., Хвостиков С. А., Ховратович Т. С. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
 24. Саворский В. П., Лупян Е. А., Горный В. И., Ермаков Д. М., Панова О. Ю., Константинова А. М. Методы и инструменты анализа данных ДЗЗ для выявления изменений растительного покрова, вызванных техногенными отходами и отвалами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 31–47. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-31-47.
 25. Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2014. 194 с.
 26. Cleugh H. A., Leuning R., Mu Q., Running S. W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 106. P. 285–304.
 27. Copernicus Sentinel-5P data products. TROPOMI Level 2 Ultraviolet Aerosol Index products. Version 01 / European Space Agency. 2018. <https://doi.org/10.5270/S5P-0wafvaf>.
 28. Copernicus Sentinel-5P data products. TROPOMI Level 2 Carbon Monoxide total column products. Version 02 (2021a) / European Space Agency. 2021. <https://doi.org/10.5270/S5P-bj3nry0>.
 29. Copernicus Sentinel-5P data products. TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products. Version 02 (2021b) / European Space Agency. 2021. <https://doi.org/10.5270/S5P-9bnp8q8>.

30. Feng L., Hu C., Chen X., Cai X., Tian L., Chen L. Human induced turbidity changes in Poyang Lake between 2000 and 2010: Observations from MODIS // *J. Geophysical Research*. 2012. V. 117. No. C7. <https://doi.org/10.1029/2011JC007864>.
31. Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R. Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 140. P. 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>.
32. Fisher A., Flood N., Danahe T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 175. P. 167–182. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.055.
33. Follette-Cook M., Gupta P. Remote Sensing of Trace Gases // *NASA Remote Sensing for Air Quality Applications*. March 20–23, 2018, Jakarta, Indonesia. 2018. 51 p.
34. Gao B. C. A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Imaging Spectrometry*. 1995. V. 2480. P. 225–236. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
35. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh. Remote Mapping of Thermodynamic Index of Ecosystem Health Disturbance // *J. Environmental Protection*. 2010. V. 1. P. 242–250.
36. Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans // *Remote Sensing of Environment*. 2009. V. 113. P. 2118–2129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012>.
37. Hu M., Ma R., Cao Z., Xiong J., Xue K. Remote Estimation of Trophic State Index for Inland Waters Using Landsat-8 OLI Imagery // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Art. No. 1988. 24 p. DOI: 10.3390/rs13101988.
38. Khudsar T., Mahmooduzzafar I. M., Sairam R. K. Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua* // *Biologia Plantarum*. 2004. V. 48. No. 2. P. 255–260.
39. Krupa S. G., Arndt U., Dempster J. P., Manning W. J. The Hohenheim long-term experiment: Effects of ozone, sulphur dioxide and simulated acidic precipitation on Tree Species in a Microcosm // *Environmental Pollution*. 1990. V. 68. No. 3–4. P. 193–481.
40. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 1. Art. No. 77. 19 p. <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
41. McFeeters S. K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // *Intern. J. Remote Sensing*. 1996. V. 17. No. 7. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
42. Mustafa T. M., Modher H., Hassoon K. I., Abd M. H. Using water indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI AND AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and GIS techniques // *Intern. J. Research — IJRG*. 2017. V. 5. No. 10. P. 117–128. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1040209>.
43. Pahlevan N., Ackleson S., Shaeffer B. Toward a satellite-based monitoring system for water quality // *EOS: Trans. American Geophysical Union*. 2018. V. 99. DOI: 10.1029/2018EO093913.
44. Papathanasopoulou E., Simis S. Satellite-assisted monitoring of water quality to support the implementation of the Water Framework Directive // *EOMORES white paper*. 2019. 28 p. DOI: 10.5281/zenodo.3463050.
45. Romanowska E., Igamberdiev A. V., Parys E., Gardeström P. Stimulation of respiration by Pb²⁺ in detached leaves and mitochondria of C₃ and C₄ plants // *Physiologia Plantarum*. 2002. V. 116. No. 2. P. 148–154. DOI: 10.1034/j.1399-3054.2002.1160203.x.
46. Running S., Mu Q., Zhao M. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 / NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2017. DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.006.
47. Vassilev A., Berova M., Zlatev Z. Influence of Cd²⁺ on growth, chlorophyll content, and water relations in young barley plants // *Biologia Plantarum*. 1998. V. 41. No. 4. P. 601–606.
48. Wang X., Yang W. Water quality monitoring and evaluation using remote sensing techniques in China: a systematic review // *Ecosystem Health and Sustainability*. 2019. V. 5. No. 1. P. 47–56. <https://doi.org/10.1080/20964129.2019.1571443>.
49. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *Intern. J. Remote Sensing*. 2006. V. 27(14). P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.
50. Zhang K., Thapa B., Ross M., Gann D. Remote sensing of seasonal changes and disturbances in mangrove forest: a case study from South Florida // *Ecosphere*. 2016. V. 7(6). P. 1–23.
51. Zhang T., Ren H., Qin Q., Zhang C., Sun Y. Surface water extraction from Landsat 8 OLI imagery using the LBV transformation // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. V. 10(10). P. 4417–4429. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2719029.

The possibilities of organizing long-term remote monitoring of large sources of anthropogenic pollution to assess their impact on the environment

E. A. Loupian¹, A. M. Konstantinova¹, A. V. Kashnitskii¹, D. M. Ermakov^{1,2},
V. P. Savorskiy², O. Yu. Panova², A. A. Bril¹

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru

² Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino 141190, Moscow region, Russia
E-mail: savor@inbox.ru

The study of the impact of large sources of anthropogenic pollution (LSAP) on the environment and the organization of monitoring of this impact is an important and urgent task. At the same time, in the case when it is required to control LSAP, which can affect large areas (hundreds of square kilometers), the solution of such problems is practically impossible without the use of remote, primarily satellite, methods that allow obtaining uniform objective information about the state such territories. A significant part of the territories located in the zone of influence of LSAP in Russia is sparsely populated and difficult to access, so obtaining constant information about their condition is virtually impossible without the use of satellite observations. Therefore, in recent years, methods and approaches have begun to actively develop, focused on the possibility of organizing remote monitoring of the regions where LSAP is located to assess their impact on the environment. Methods for organizing the processing of satellite data were also actively developed, with the use of which constant monitoring of the zones of influence of LSAP on the environment can be organized. In the future, this should allow organizing automated long-term remote monitoring of LSAP. This paper presents the main possibilities for organizing such monitoring, describes an experimental system for remote monitoring of the areas where various LSAP are located, created on the basis of the CKP "IKI-Monitoring" (<http://ckp.geosmis.ru>), and using the example of a comprehensive analysis of the impact of the Kachkanar mining and processing plant the possibilities of the available approaches to the analysis of satellite data and the created experimental system are presented on the surrounding region.

Keywords: sources of anthropogenic pollution, man-made waste, dumps, remote monitoring, plant objects, water objects, control areas, spectral indices, CKP "IKI-Monitoring"

Accepted: 16.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213

References

1. Abramenko A. V., *Kompleksnaya kharakteristika sostoyaniya prirodnoi sredy gorodskogo okruga Kachkanar Sverdlovskoi oblasti i ee izuchenie vo vneurochnoi deyatel'nosti s obuchayushchimisya* (A comprehensive description of the state of the natural environment of the urban district of Kachkanar of the Sverdlovsk region and its study in extracurricular activities with student), Final qualifying work, Ekaterinburg: UGPU, 2019, 57 p. (in Russian).
2. Alekseev Yu. V., *Tyazhelye metally v agrolandshafte, nauchno-prakticheskoe posobie* (Heavy metals in the agricultural landscape, scientific and practical manual), Saint Petersburg: PIYaF RAN, 2008, 216 p. (in Russian).
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 203–221 (in Russian).
4. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
5. 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, Vol. 15, No. 2, pp. 144–158 (in Russian).

6. Buznikov A. A., Timofeev A. A., Regional ecological monitoring: method and hardware/software complex for distant estimation of pollution to which heavy metals expose indicator species of vegetation, *Regional'naya ekologiya*, 2010, No. 3(29), pp. 9–17 (in Russian).
7. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Lapytov I. S., Thermodynamic approach for remote mapping of ecosystem disturbance, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 179–194 (in Russian).
8. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Khramtsov V. N., Verification of large scale maps of thermodynamic index ecosystem health disturbance, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 201–212 (in Russian).
9. Gornyy V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Thermodynamic approach to satellite mapping of accumulated ecological losses of forest ecosystems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 124–136 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-124-136.
10. *State Report "On the state and protection of the environment in the Sverdlovsk region in 2015"*, Ministry of Natural Resources and Environment of the Sverdlovsk region, Ekaterinburg, 2016, 312 p. (in Russian).
11. *State Report "On the state of the environment in the Sverdlovsk region in 2020"*, Ministry of Natural Resources and Environment of the Sverdlovsk region, Ekaterinburg, 2021, 329 p. (in Russian).
12. Grigorieva O. V., Drozdova I. V., Shilin B. V., Experimental substantiation of the capabilities of videospectral remote indication of short-term vegetation stress, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 78–88 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-78-88.
13. Ermakov D. M., Demenev A. D., Meshcheriakova O. Yu., Berezina O. A., Features of the development of a regional water index for monitoring the impact of acid mine water discharges on river systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 222–237 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-222-237.
14. Kalabin G. V., Evdokimova G. A., Gornyy V. I., Estimation of dynamics of grows of derelict lands in process of deleterious effect decrease of OJSC "Severonickel Combine" on environment, *Gornyy zhurnal*, 2010, No. 2, pp. 74–77 (in Russian).
15. Kalabin G. V., Moiseenko T. I., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Soromotin A. V., Satellite monitoring of the reaction of the vegetation cover to the impact of the opencast mining company OLIMPIADA gold mine, *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2013, No. 1, pp. 177–184 (in Russian).
16. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Satellite monitoring of vegetation cover response to the impact of the enterprise for the development of the Sorsky copper-molybdenum deposit, *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2014, No. 1, pp. 153–161 (in Russian).
17. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Assessment of the environmental condition of the territory of Kachkanarsky GOK according to satellite monitoring data, *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2016, No. 2, pp. 179–187 (in Russian).
18. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Davidan T. A., Kritsuk S. G., Tronin A. A., The response of the tundra ecosystem to the removal of anthropogenic load from the Valkumey mine, *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2018, No. 2, pp. 146–153 (in Russian).
19. Konstantinova A. M., Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Mukhamedzhanov I. D., Unified technology for remote monitoring of natural and anthropogenic objects, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 41–52 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52.
20. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Kalabin G. V., Latypov I. Sh., Regularities of Vegetation Index Annual Cycles in the Region of Sorsk Mining and Metallurgical Complex, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 13, pp. 228–237.
21. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
22. 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, tailing dumps, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 243–261 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-243-261.
23. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Bril A. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Miklashevich T. S., Plotnikov D. E., Radchenko M. V., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Khvostikov S. A., Khovratovich T. S., Vega-Science system: design features, main

- capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 9–31 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
24. Savorskiy V. P., Loupian E. A., Gornyy V. I., Ermakov D. M., Panova O. Yu., Konstantinova A. M., Methods and information tools for analyzing remote sensing data to detect changes in vegetation caused by industrial waste and dumps, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 31–47 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-31-47.
25. Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V., *Tyazhelye metally i rasteniya* (Heavy metals and plants), Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2014, 194 p. (in Russian).
26. Cleugh H. A., Leuning R., Mu Q., Running S. W., Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 106, pp. 285–304.
27. *Copernicus Sentinel-5P data products, TROPOMI Level 2 Ultraviolet Aerosol Index products, Version 01*, European Space Agency, 2018, <https://doi.org/10.5270/S5P-0wafvaf>.
28. *Copernicus Sentinel-5P data products, TROPOMI Level 2 Carbon Monoxide total column products, Version 02* (2021a), European Space Agency, 2021, <https://doi.org/10.5270/S5P-bj3nry0>.
29. *Copernicus Sentinel-5P data products, TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products, Version 02* (2021b), European Space Agency, 2021, <https://doi.org/10.5270/S5P-9bnp8q8>.
30. Feng L., Hu C., Chen X., Cai X., Tian L., Chen L., Human induced turbidity changes in Poyang Lake between 2000 and 2010: Observations from MODIS, *J. Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, No. C7, <https://doi.org/10.1029/2011JC007864>.
31. Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R., Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 140, pp. 23–35, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>.
32. Fisher A., Flood N., Danahe T., Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 175, pp. 167–182, DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.055.
33. Follette-Cook M., Gupta P., Remote Sensing of Trace Gases, *NASA Remote Sensing for Air Quality Applications*, March 20–23, 2018, Jakarta, Indonesia, 2018, 51 p.
34. Gao B. C., A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Imaging Spectrometry*, 1995, Vol. 2480, pp. 225–236, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
35. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Remote Mapping of Thermodynamic Index of Ecosystem Health Disturbance, *J. Environmental Protection*, 2010, Vol. 1, pp. 242–250.
36. Hu C., A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, pp. 2118–2129, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012>.
37. Hu M., Ma R., Cao Z., Xiong J., Xue K., Remote Estimation of Trophic State Index for Inland Waters Using Landsat-8 OLI Imagery, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Art. No. 1988, 24 p., DOI: 10.3390/rs13101988.
38. Khudsar T., Mahmooduzzafar, I. M., Sairam R. K., Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua*, *Biologia Plantarum*, 2004, Vol. 48, No. 2, pp. 255–260.
39. Krupa S. G., Arndt U., Dempster J. P., Manning W. J., The Hohenheim long-term experiment: Effects of ozone, sulphur dioxide and simulated acidic precipitation on Tree Species in a Microcosm, *Environmental Pollution*, 1990, Vol. 68, No. 3–4, pp. 193–481.
40. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Art. No. 77, 19 p., <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
41. McFeeters S. K., The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 7, pp. 1425–1432, <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
42. Mustafa T. M., Modher H., Hassoon K. I., Abd M. H., Using water indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI AND AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and GIS techniques, *Intern. J. Research — IJRG*, 2017, Vol. 5, No. 10, pp. 117–128, <https://doi.org/10.5281/zenodo.1040209>.
43. Pahlevan N., Ackleson S., Shaeffer B., Toward a satellite-based monitoring system for water quality, *EOS: Trans. American Geophysical Union*, 2018, Vol. 99, DOI: 10.1029/2018EO093913.
44. Papathanaopoulou E., Simis S., Satellite-assisted monitoring of water quality to support the implementation of the Water Framework Directive, *EOMORES white paper*, 2019, 28 p., DOI: 10.5281/zenodo.3463050.
45. Romanowska E., Igamberdiev A. V., Parys E., Gardeström P., Stimulation of respiration by Pb²⁺ in detached leaves and mitochondria of C₃ and C₄ plants, *Physiologia Plantarum*, 2002, Vol. 116, No. 2, pp. 148–154, DOI: 10.1034/j.1399-3054.2002.1160203.x.
46. Running S., Mu Q., Zhao M., *MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006*, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2017, DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.006.

47. Vassilev A., Berova M., Zlatev Z., Influence of Cd^{2+} on growth, chlorophyll content, and water relations in young barley plants, *Biologia Plantarum*, 1998, Vol. 41, No. 4, pp. 601–606.
48. Wang X., Yang W., Water quality monitoring and evaluation using remote sensing techniques in China: a systematic review, *Ecosystem Health and Sustainability*, 2019, Vol. 5, No. 1, pp. 47–56, <https://doi.org/10.1080/20964129.2019.1571443>.
49. Xu H., Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27(14), pp. 3025–3033, DOI: 10.1080/01431160600589179.
50. Zhang K., Thapa B., Ross M., Gann D., Remote sensing of seasonal changes and disturbances in mangrove forest: a case study from South Florida, *Ecosphere*, 2016, Vol. 7(6), pp. 1–23.
51. Zhang T., Ren H., Qin Q., Zhang C., Sun Y., Surface water extraction from Landsat 8 OLI imagery using the LBV transformation, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10(10), pp. 4417–4429, DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2719029.