Разработка системы анализа состояния окружающей среды в зонах расположения крупных промышленных объектов, хвостохранилищ и отвалов

Е. А. Лупян[1], А. М. Константинова[1], И. В. Балашов[1], А. В. Кашницкий[1], В. П. Саворский[2], О. Ю. Панова[2]

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

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

В работе рассматриваются возможности организации постоянного дистанционного мониторинга районов влияния источников техногенных отходов и отвалов (ИТОО). Представлена созданная на базе Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» подсистема работы с данными дистанционного мониторинга, ориентированная на решение этих задач. Описаны особенности построения данной подсистемы, предложены и реализованы программно-алгоритмические решения, а также представлены её текущие возможности. Созданный набор инструментов сбора и анализа данных спутникового мониторинга позволяет решать разнообразные задачи, связанные с изучением и мониторингом влияния крупных промышленных источников загрязнения, в том числе и ИТОО, на окружающую среду. В состав подсистемы входят инструменты как для ретроспективного анализа различных районов с ИТОО, так и для их постоянного оперативного мониторинга. Реализуемость и эффективность работы подсистемы подтверждена приведёнными в работе примерами её использования для организации дистанционного мониторинга зон потенциальных загрязнений от ИТОО, в том числе возможностей анализа долговременных изменений, происходящих в различных растительных и водных объектах, расположенных в этих зонах.

Ключевые слова: техногенные отходы, отвалы, дистанционный мониторинг, растительные объекты, водные объекты, контрольные участки, спектральные индексы, подсистема ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Одобрена к печати: 20.12.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-243-261

Введение

Крупные промышленные объекты, в том числе хвостохранилища обогатительных предприятий и отвалов, которые образуются при добыче полезных ископаемых открытым способом, оказывают существенное влияние на окружающую среду. Изучению данных проблем посвящено значительное число работ (см., например, публикации (Бузников, Тимофеев, 2010; Горный и др., 2013; Калабин и др., 2018; Саворский и др., 2019; Титов и др., 2014; Cleugh et al., 2007; Krupa, Arndt, 1990; Running et al., 2017)). Следует отметить, что такое влияние может иметь долгосрочный характер и его последствия проявляются на достаточно больших временных промежутках. Для того чтобы оценивать, исследовать и анализировать последствия подобного влияния, необходимо вести долговременный (исчисляемый десятилетиями) дистанционный мониторинг таких районов. Отметим, что подобный мониторинг, особенно крупных промышленных объектов, которые зачастую могут оказывать влияние на большие территории, часть из которых к тому же могут быть расположены в труднодоступных районах, во многих случаях невозможно проводить без использования средств дистанционного мониторинга, в первую очередь спутниковых. Сегодня спутниковые методы позволяют оценить как достаточно большое число параметров загрязнений, которые могут оказывать негативное влияние на окружающую среду, так и характеристики состояния окружающей среды в регионах наблюдений, в том числе состояние растительного покрова (Григорьева и др.,

2018; Горный и др., 2019; Калабин и др., 2014; Титов и др., 2007; Metals..., 1999). Следует также отметить, что спутниковые наблюдения имеют достаточно большую историю и практически по всем районам Земли уже накоплены значительные архивы спутниковых данных, глубина которых исчисляется десятилетиями. Всё это позволяет не только вести оперативный дистанционный мониторинг районов потенциального загрязнения крупными промышленными объектами, но и анализировать возникающие в них долговременные изменения состояния окружающей среды, в первую очередь растительного покрова. В тоже время проведение такого мониторинга и анализа многолетних рядов наблюдений может эффективно проводиться только с использованием специализированных автоматизированных информационных систем анализа спутниковых данных. В работе (Саворский и др., 2019) был предложен подход к проведению дистанционного мониторинга на основе постоянного контроля различных характерных объектов, расположенных в исследуемых районах, и исследования их динамики. Для реализации данного подхода на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/) (Лупян и др., 2019) была создана автоматизированная подсистема, позволяющая автоматически получать и анализировать архивную и оперативную информацию по различным объектам, находящимся в зоне потенциальных загрязнений от источников техногенных отходов и отвалов (ИТОО). В настоящей работе описаны основные задачи и особенности построения данной подсистемы, а также представлены её текущие возможности. В работе также приведены примеры её использования для организации дистанционного мониторинга зон потенциальных загрязнений от ИТОО, в том числе возможностей анализа долговременных изменений, происходящих в различных природных объектах, расположенных в этих зонах.

Основные функциональные задачи, на решение которых ориентирована подсистема дистанционного мониторинга ИТОО

В составе подсистемы дистанционного мониторинга влияния ИТОО должны быть реализованы:

- инструменты для формирования описаний районов наблюдений;
- блок автоматизированного расчёта различных характеристик наблюдаемых объектов на основе оперативной и архивной спутниковой информации и результатов её обработки;
- блок автоматизированного ведения различных баз данных (БД), содержащих информацию о районе и объектах наблюдения;
- инструменты для анализа формируемой на основе спутниковых данных информации как по наблюдаемым районам в целом, так и по различным природным объектам, мониторинг которых осуществляется в рамках конкретного района;
- служебные интерфейсы для управления работой подсистемы.

Инструменты формирования описаний районов наблюдений должны позволять:

- регистрировать районы наблюдений и определять их основные характеристики (в том числе: границы, описания источников загрязнений и объектов наблюдения, включая их координаты, виды производственной деятельности и период функционирования), используя для этого детальные описания (см., например, монографии (Зеньков и др., 2017, 2018);
- регистрировать связанные с районами наблюдений объекты наблюдения и задавать их основные характеристики (типы, рассчитываемые параметры, правила и времена наблюдений и т. д.).

Блок автоматизированного расчёта различных характеристик наблюдаемых объектов на основе оперативной и архивной спутниковой информации и результатов её обработки должен позволять:

- осуществлять автоматический выбор необходимой для расчёта информации из архивов ЦКП «ИКИ Мониторинг»;

- проводить автоматизированный расчёт различного рода характеристик на основе спутниковых данных и усреднение полученных оценок по территории конкретных объектов и зон наблюдения;
- формировать долговременные ряды наблюдений;
- автоматически пополнять БД наблюдений.

Блок автоматизированного ведения специализированных БД должен позволять организовывать автоматизированный сбор и анализ информации:

- об исследуемом районе (координаты района, тип загрязнения, координаты объектов наблюдения);
- о типах объектов ИТОО (координаты, вид загрязнителя, тип объекта (ИТОО, загрязнённый участок, незагрязнённый участок));
- о рядах наблюдений различных объектов (для каждого объекта наблюдений ряд спектральных индексов и/или продуктов обработки, описывающих объект в соответствии с его типом).

Инструменты анализа формируемой на основе спутниковых данных информации по районам и различным природным объектам, за которыми ведётся наблюдение, должны обеспечивать возможности анализировать характеристики объектов, полученные в результате автоматизированной обработки спутниковых данных. Эти инструменты также должны поддерживать процедуры динамического определения различных дополнительных (виртуальных) характеристик наблюдаемых объектов. Для анализа характеристик объектов должны как минимум быть реализованы следующие типы интерфейсов:

- картографический интерфейс, обеспечивающий возможности пространственной визуализации и анализа характеристик объектов;
- интерфейсы анализа временных рядов, характеристик объектов;
- табличные интерфейсы, обеспечивающие автоматизированное построение отчётных форм и отчётов.

Служебные интерфейсы управления работой подсистемы дистанционного мониторинга влияния ИТОО должны обеспечивать:

- возможность заводить объекты контроля определенного типа (ИТОО, «контрольные» и «референсные» участки), графически представляющие собой произвольные полигоны с указанием периода наблюдения — временного окна для поиска спутниковых сцен в архиве, по которым будет проводиться дистанционный мониторинг, либо указания постоянного наблюдения за объектом;
- возможность вводить новые индексы, а также индексы, получаемые с помощью новых инструментов спутникового мониторинга;
- реализацию возможности визуализации рассчитанных показателей на карте с использованием цветовой палитры.

Основа для подсистемы дистанционного мониторинга ИТОО на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Создаваемая подсистема мониторинга ИТОО фактически должна использовать все основные компоненты, обеспечивающие автоматизированную работу со спутниковыми данными и результатами их обработки в ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Эти компоненты достаточно подробно описаны в публикациях (Кобец и др., 2018; Прошин и др., 2016; Толпин и др., 2011; Kashnitskiy et al., 2017). Реализация инструментов мониторинга ИТОО с использованием этих компонент осуществлялась на основе входящей в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг» информационной системы (ИС) «Вега-Science» (http://sci-vega.ru/).

В качестве основы для создания и ведения различных БД в составе подсистемы мониторинга ИТОО использовался разработанный в Институте космических исследований

РАН (ИКИ РАН) программный комплекс (ПК) ObjectsServeysSMIS_les (госрегистрация № 2016662696 от 21 ноября 2016 г.). Этот комплекс создан для решения задач дистанционного мониторинга состояния лесов и происходящих в них изменений. Комплекс обеспечивает выполнение следующих функций: ввод и хранение объектов наблюдения, их атрибутов, связей с внешними объектами и наблюдениями; ввод внешних объектов и их атрибутов; ввод наблюдений объектов, в том числе их геометрического описания, связей с внешними объектами и атрибутов; отображение карт наблюдений объектов в картографических интерфейсах; поиск и представление данных в пользовательских интерфейсах.

В тоже время для решения задачи дистанционного мониторинга значительного числа объектов в различных районах наблюдения, каждый из которых может обладать своей спецификой (например, в них можно завести сразу несколько типов объектов с разными наборами характеристик, получаемых на основе спутниковых данных), необходимо было разработать достаточно гибкую систему, которая позволяла бы легко создавать и конфигурировать правила наблюдения данных районов исследования. При этом должна была быть реализована возможность не только стандартизованно описывать различные типы объектов, определять требования работы с ними, но и автоматически усваивать информацию об объектах во всех блоках подсистемы, обеспечивающих различный функционал работы с ними. А именно: ведение БД объектов; автоматический расчёт различных характеристик объектов на основе спутниковых данных; представление информации об объектах и их наблюдениях в графических и картографических интерфейсах; конфигурация схем наблюдения конкретных районов; автоматизированные управление и контроль работоспособности различных элементов подсистемы.

Отметим, что представленная схема расчёта используется для обработки как архивных, так и оперативных (постоянно поступающих) в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» спутниковых данных.

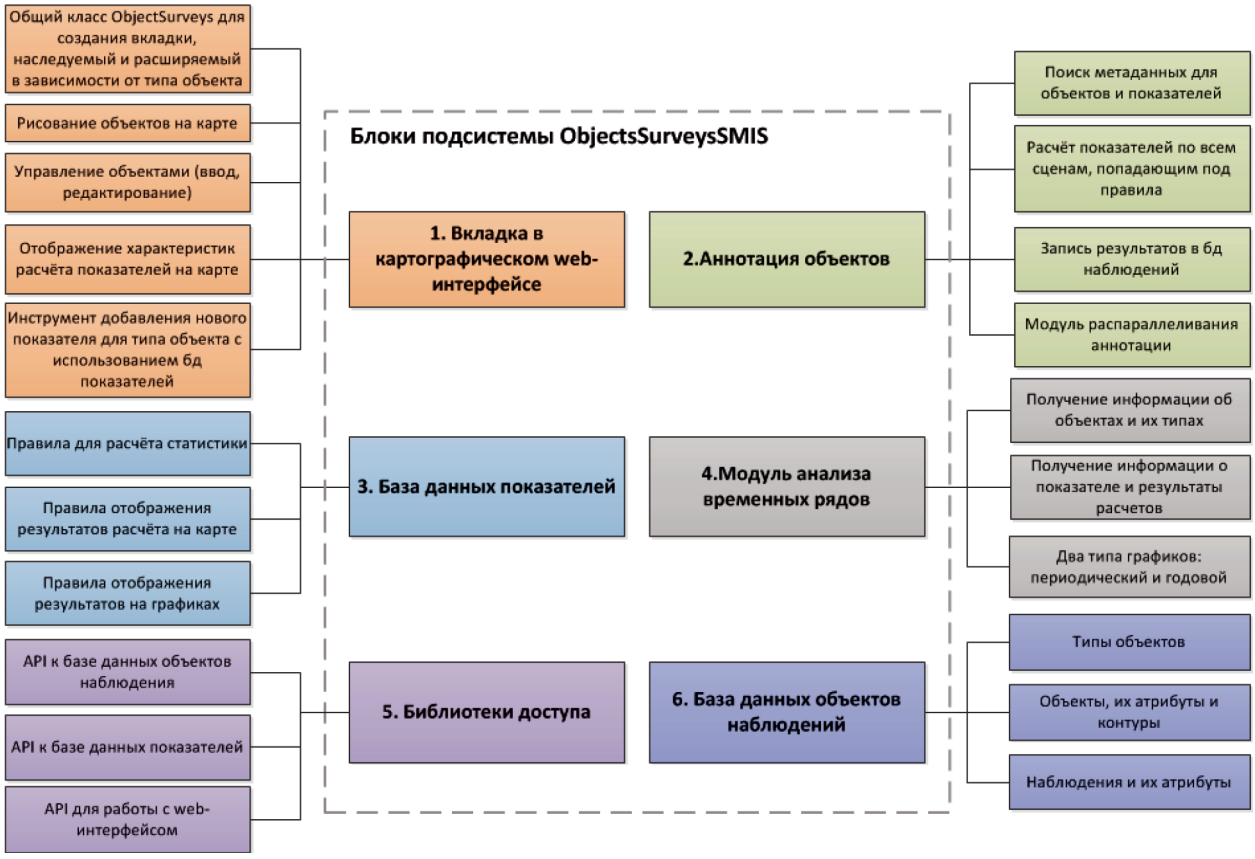

Рис. 1. Общая структура программной подсистемы ObjectsSurveysSMIS

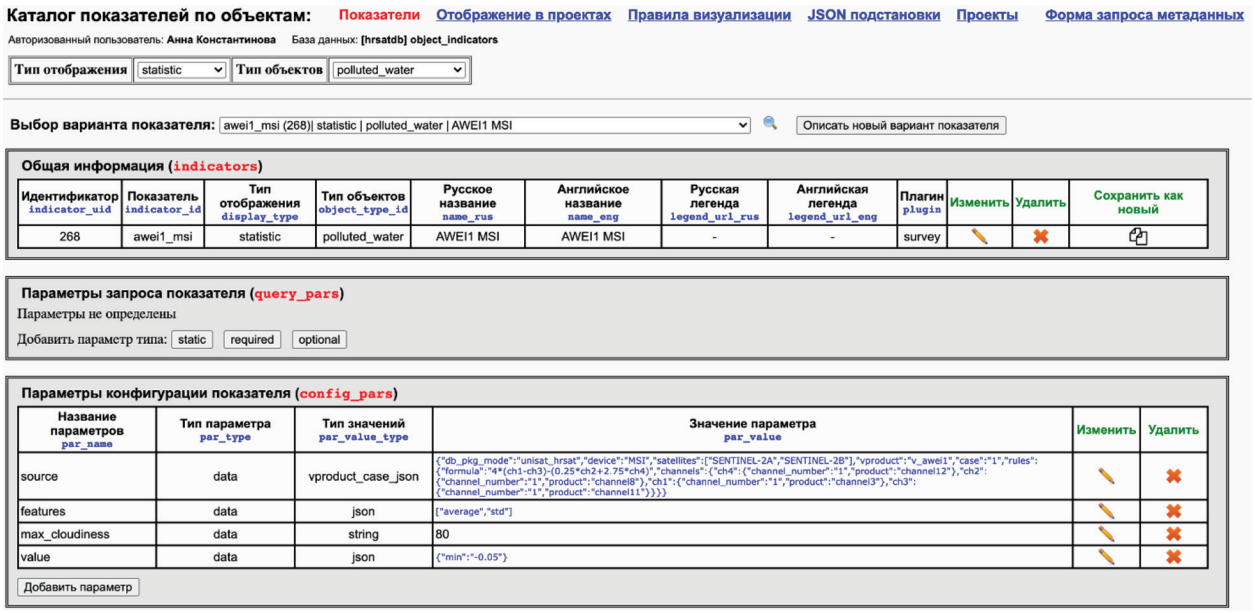

Рис. 2. Служебный интерфейс БД типов объектов наблюдения

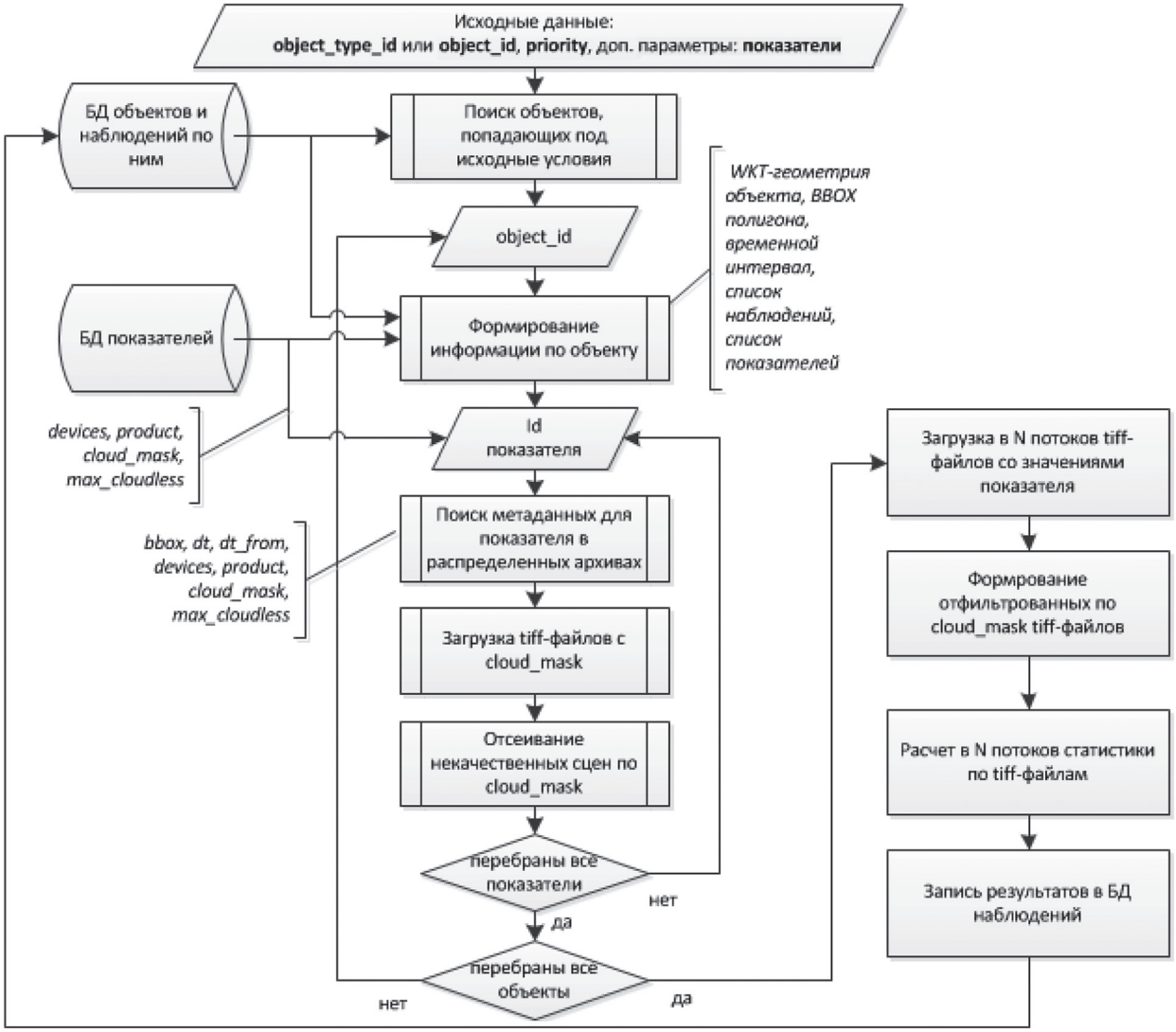

Рис. 3. Блок-схема сервиса аннотирования объектов

Для согласованного решения данных задач на основе ПК ObjectsServeysSMIS_les была создана и интегрирована в ИС «Вега-Science» программная подсистема ObjectsSurveysSMIS (Константинова и др., 2020). Её общая структура представлена на *рис. 1* (см. с. 246).

Созданная программная подсистема обеспечила возможность комплексного решения задач, возникающих при мониторинге различных объектов и явлений. Следует отметить, что эти задачи актуальны не только при организации дистанционного мониторинга районов расположения ИТОО, но и для мониторинга широкого класса различных типов объектов. Такая возможность в первую очередь достигается за счёт того, что подсистема позволяет достаточно просто заводить новые типы объектов и описывать правила работы с ними, после чего эта информация автоматически усваивается в различных блоках подсистемы, обеспечивая работу с новым типом объектов наблюдения (расчёт его характеристик, ведение БД этих характеристик, отображение их в различных интерфейсах анализа данных). Пример веб-интерфейса администратора, который позволяет заводить новые типы объектов и управлять уже существующими, приведён на *рис. 2* (см. с. 247).

Особенно следует отметить, что в рамках программной подсистемы ObjectsSurveysSMIS был создан унифицированный сервис расчёта различных характеристик объектов на основе спутниковых данных (сервис аннотирования). Его блок-схема представлена на *рис. 3* (см. с. 247). На вход процесса аннотирования поступает информация о типе аннотируемых объектов и периоде, за который должны быть посчитаны характеристики. Для указанного типа объекта из БД показателей запрашивается список рассчитываемых характеристик и информация о спутниковых системах, данные которых могут использоваться для расчёта, описанная в источниках данных показателей, затем формируются блоки запросов для поиска в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» спутниковых сцен, удовлетворяющих заданным условиям. По найденным сценам с учётом наличия облачности рассчитываются необходимые для объекта характеристики.

Основной функционал подсистемы мониторинга ИТОО, реализованный в ИС «Вега-Science»

Для управления работой подсистемы мониторинга ИТОО и решения описанных выше функциональных задач в ИС «Вега-Science» были созданы специальные инструменты, позволяющие:

- конфигурировать районы исследования;
- заводить в них объекты мониторинга и определять их свойства;
- проводить пространственный анализ объектов, находящихся под мониторингом, и рассчитанных для них на основе спутниковых данных различных характеристик;
- проводить анализ временных рядов характеристик наблюдаемых объектов, в том числе сравнение информации, получаемой по нескольким объектам.

В настоящее время подсистема позволяет заводить и проводить мониторинг (непрерывный расчёт различных характеристик на основе архивных и оперативных спутниковых данных) следующих типов объектов:

- район наблюдений;
- источник загрязнений;
- «чистые» участки суши (могут определяться для конкретного типа растительности);
- «грязные» участки суши (могут определяться для конкретного типа растительности);
- «чистые» участки водных объектов;
- «грязные» участки водных объектов.

Для данных типов объектов определены характеристики (показатели) для расчёта (*таблица*).

Список рассчитываемых показателей для объектов наблюдения

№	Показатель	Источник данных: прибор (спутники)	Алгоритмы вычисления показателя
Объект: «Район наблюдений» (расчёт характеристик осуществляется по секторам и концентрическим кругам на разном расстоянии от цента района наблюдений**)**			
1	Аэрозольный индекс (средние за неделю, месяц, год)	TROPOMI (Sentinel-5P)	Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2018 г.
2	Диоксид азота (средние за неделю, месяц, год	TROPOMI (Sentinel-5P)	Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2018 г.
3	Угарный газ (средние за неделю, месяц, год)	TROPOMI (Sentinel-5P)	Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2018 г.
Объект: «Источник загрязнений» (осуществляется расчёт средних значений и дисперсий по объекту)			
1	Аэрозольный индекс (среднее за 7 дней)	TROPOMI (Sentinel-5P)	Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2018 г.
2	Диоксид азота (среднее за 7 дней)	TROPOMI (Sentinel-5P)	Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2018 г.
3	Угарный газ (среднее за 7 дней)	TROPOMI (Sentinel-5P)	Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2018 г.
4	NDVI (7-дневный, ежедневный)	MODIS (Terra/Aqua), MSI (Sentinel-2)	(NIR – RED)/(NIR + RED)
5	PVI (7-дневный, ежедневный)	MODIS (Terra/Aqua), MSI (Sentinel-2)	–0,74 RED + 0,67 NIR – 0,0092
6	NDVI посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	(NIR – RED)/(NIR + RED)
7	PVI посеансный	MSI (Sentinel -2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	–0,74 RED + 0,67 NIR – 0,0092
8	AWEI1 посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	4(GREEN – SWIR1) – (0,25 NIR + + 2,75 SWIR2)
9	AWEI2 посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	BLUE + 2,5 GREEN – 1,5(NIR + + SWIR1) – 0,25 SWIR2
Для чистых/грязных участков суши (осуществляется расчёт средних значений и дисперсий по объекту)			
1	NDVI (7-дневный, ежедневный)	MODIS (Terra/Aqua), MSI (Sentinel-2)	(NIR – RED)/(NIR + RED)
2	PVI (7-дневный, ежедневный)	MODIS (Terra/Aqua), MSI (Sentinel-2)	–0,74 RED + 0,67 NIR – 0,0092
3	NDVI посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	(NIR – RED)/(NIR + RED)
4	PVI посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	–0,74 RED + 0,67 NIR – 0,0092
6	Интенсивность эвапотранспирации	MODIS (Terra/Aqua)	(Running et al., 2017)
7	Показатель экологического вреда (ПЭВ) для темнохвойных лесов	MODIS (Terra/Aqua)	(Горный и др., 2019)
8	ПЭВ для смешанных лесов	MODIS (Terra/Aqua)	(Горный и др., 2019)
9	ПЭВ для лиственных лесов	MODIS (Terra/Aqua)	(Горный и др., 2019)
10	ПЭВ для светлохвойный лесов	MODIS (Terra/Aqua)	(Горный и др., 2019)
11	ПЭВ для листопадных лесов	MODIS (Terra/Aqua)	(Горный и др., 2019)

Окончание таблицы

№	Показатель	Источник данных: прибор (спутники)	Алгоритмы вычисления показателя
Для чистых/грязных водных участков водных объектов (осуществляется расчёт средних значений и дисперсий по объекту)			
1	AWEI1 посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	4(GREEN – SWIR1) – (0,25 NIR + + 2,75 SWIR2)
2	AWEI2 посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsa-8), TM (Landsat-5)	BLUE + 2,5 GREEN – 1,5(NIR + + SWIR1) – 0,25 SWIR2
3	NDWI посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	(GREEN – NIR)/(GREEN + NIR)
4	WRI посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	(GREEN + RED)/(NIR + SWIR1)
5	MNDWI посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	(GREEN – SWIR1)/(GREEN + SWIR1)
6	NDMI посеансный	MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8), TM (Landsat-5)	(NIR – SWIR1)/(NIR + SWIR1)

Примечание: NDVI — Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный разностный вегетационный индекс; PVI — Perpendicular Vegetation Index, перпендикулярный вегетационный индекс; AWEI — Automated Water Extraction Index, автоматизированный индекс выделения воды; WRI — Water Ratio Index, водный индекс; MNDWI — Modification of Normalised Difference Water Index, модифицированный нормализованный разностный водный индекс; NDMI — Normalized Difference Moisture, стандартизованный индекс различий увлажнённости. MODIS — *англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; MSI — *англ.* Multispectral Instrument. NIR — *англ.* near infrared, ближний инфракрасный диапазон; SWIR — *англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный диапазон.

Отметим, что и состав используемых в исследованиях типов объектов, и состав применяемых для их анализа характеристик может достаточно легко меняться и расширяться.

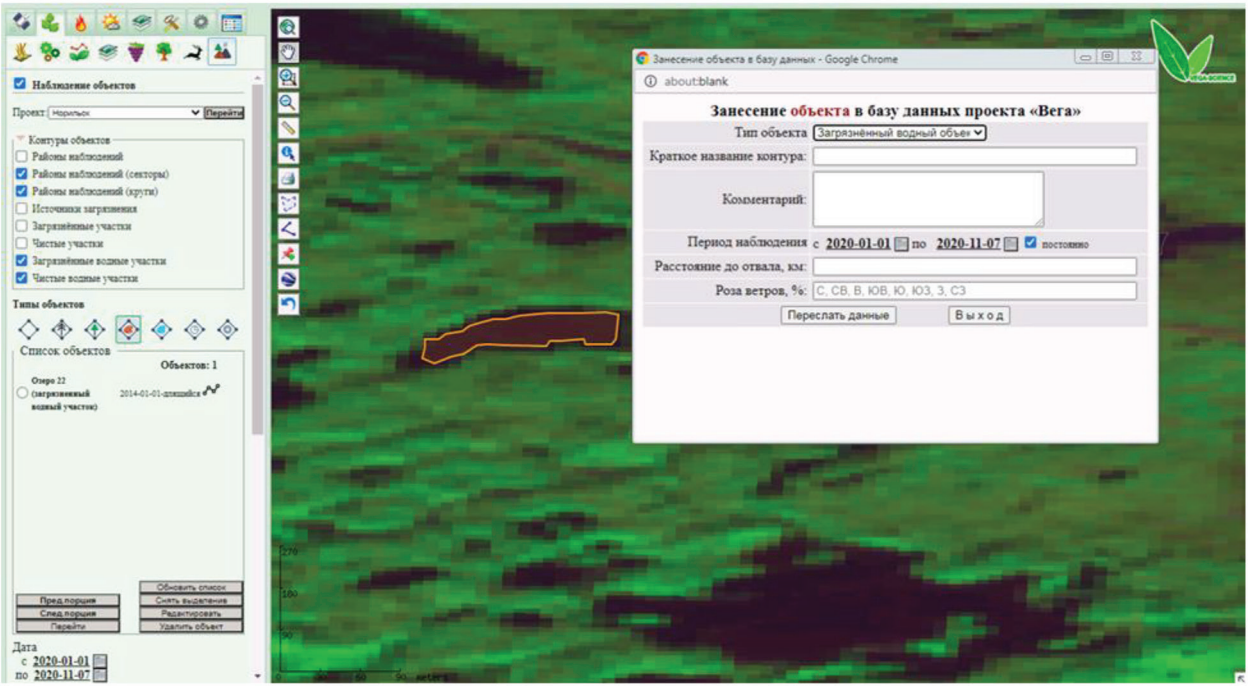

Рис. 4. Вид специализированного раздела интерфейса управления параметрами районов мониторинга ИТОО и входящими в них объектов

В рамках картографического веб-интерфейса ИС «Вега-Science» реализован специальный раздел (вкладка), позволяющий управлять характеристиками района исследования и входящими в него объектами, а также параметрами визуализации информации о различных объектах. Вид интерфейса данного раздела приведён на *рис. 4* (см. с. 250).

Для анализа информации, получаемой в процессе мониторинга, реализованы инструменты, позволяющие, как уже отмечалось выше, анализировать различные характеристики объектов наблюдений как в картографическом интерфейсе, так и в интерфейсах анализа временных рядов. Некоторые примеры возможностей проведения такого анализа с помощью созданных инструментов для различных зон ИТОО приведены в следующем разделе настоящей работы.

Примеры использования созданной подсистемы для анализа состояния окружающей среды и различных природных объектов в зонах влияния ИТОО

В настоящее время с помощью созданной подсистемы ведётся дистанционный мониторинг состояния более 20 районов расположения ИТОО (*рис. 5*).

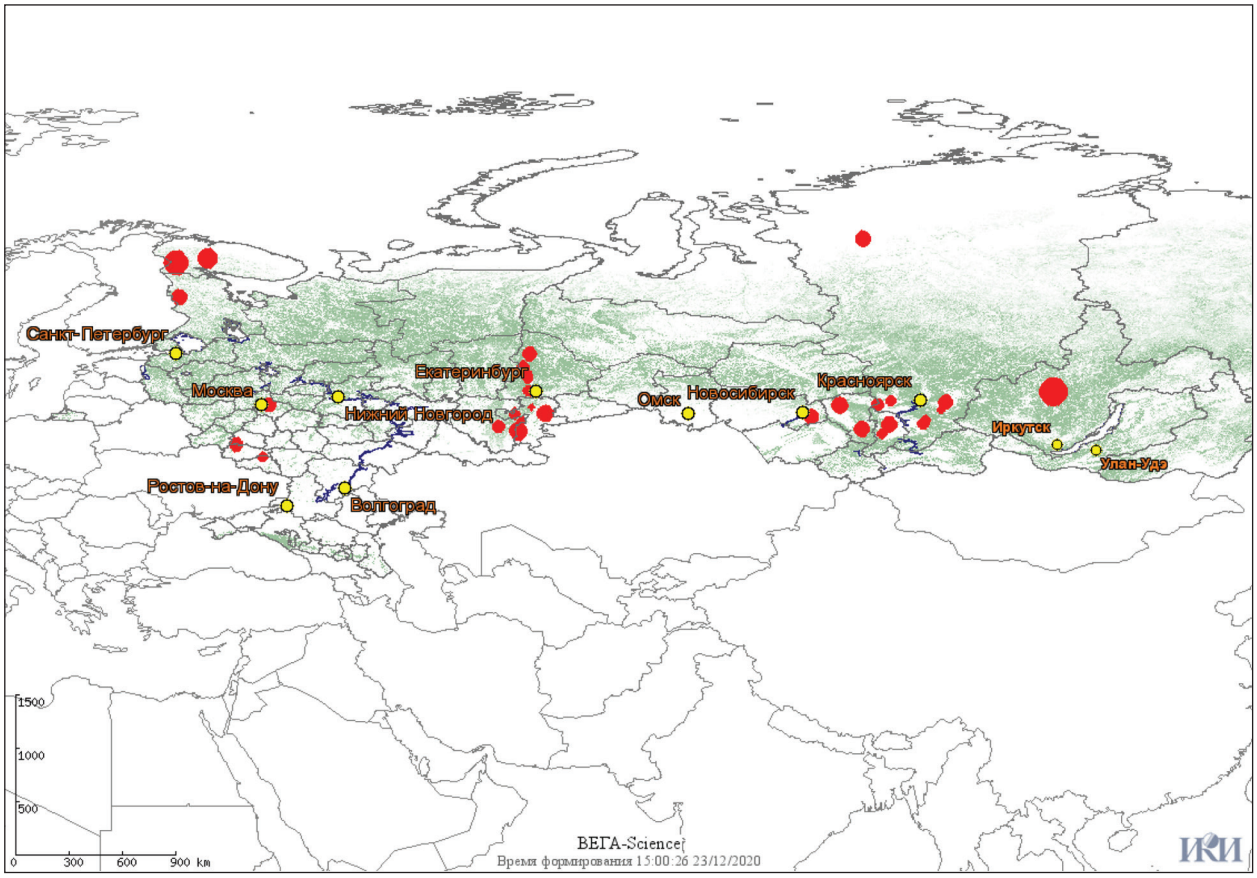

Рис. 5. Карта районов расположения ИТОО

Детальному обсуждению результатов данного мониторинга авторы планируют в последующем посвятить отдельные работы. В настоящем разделе мы приведём лишь несколько примеров использования разработанной подсистемы и входящих в её состав инструментов для анализа особенностей влияния ИТОО на окружающую среду.

Данные примеры будут представлены по результатам мониторинга территорий в окрестностях следующих объектов:

1) отвалы железорудного рудника «Малый Куйбас» «ОАО ММК», расположенного на Южном Урале недалеко от Магнитогорска в Челябинской обл.;
2) отвалы Качканарского горно-обогатительного комбината, добыча руды на котором ведётся открытым способом;
3) хвостохранилища «Новое» (открыто в 2017 г.) и «Лебяжье», используемые для хранения отходов Талнахской обогатительной фабрики сульфидных медно-никелевых руд ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

Анализ интегрального влияния рудника Малый Куйбас «ОАО ММК» (Магнитогорск) на окружающую среду

Для анализа интегрального влияния ИТОО, отвалы рудника Малый Куйбас, на окружающую среду были использованы два дополняющих друг друга инструмента выделения загрязнённых участков по данным дистанционного мониторинга ИТОО, а именно: 1) выделение загрязнённых участков по результатам оценок концентрации антропогенных атмосферных загрязнителей (концентрации диоксида азота) и 2) выделение загрязнённых участков по степени загрязнения снежного покрова. На *рис. 6* представлено среднегодовое распределение концентрации диоксида азота в районе наблюдений.

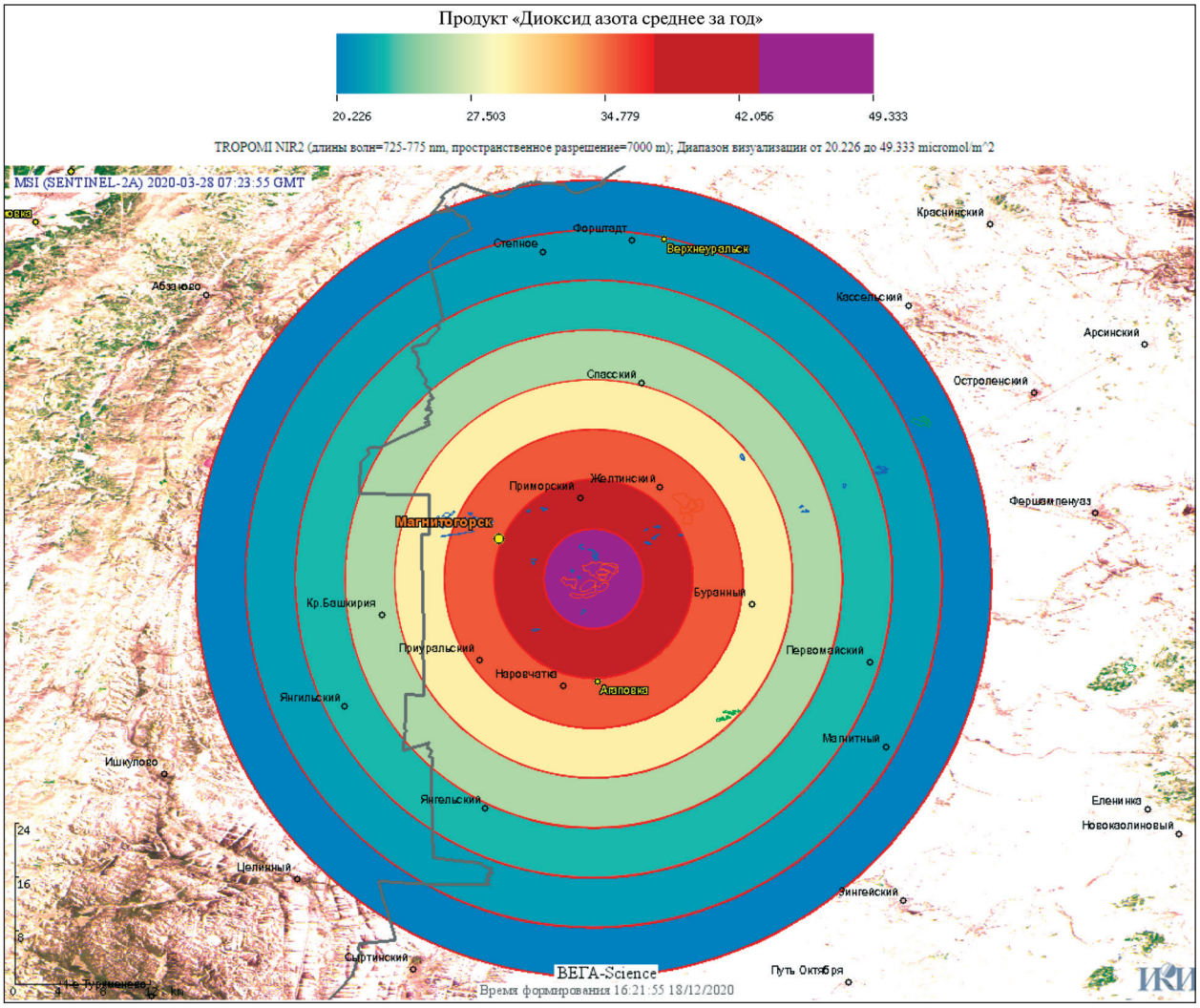

Рис. 6. Среднегодовая концентрация диоксида азота в атмосфере по данным Sentinel-5 (TROPOMI) в окрестностях рудника «Малый Куйбас» (Магнитогорск)

На *рис. 7* показано весеннее (март 2020 г.) изображение района наблюдений, полученного по данным спутника Sentinel-2A, на котором хорошо видна зона схода снежного покрова, во многом соответствующая зоне загрязнений в наблюдаемом районе. Из рисунков видно, что зона загрязнений (см. *рис. 7*) хорошо совпадает с зоной сильных среднегодовых концентраций диоксида азота (см. *рис. 6*).

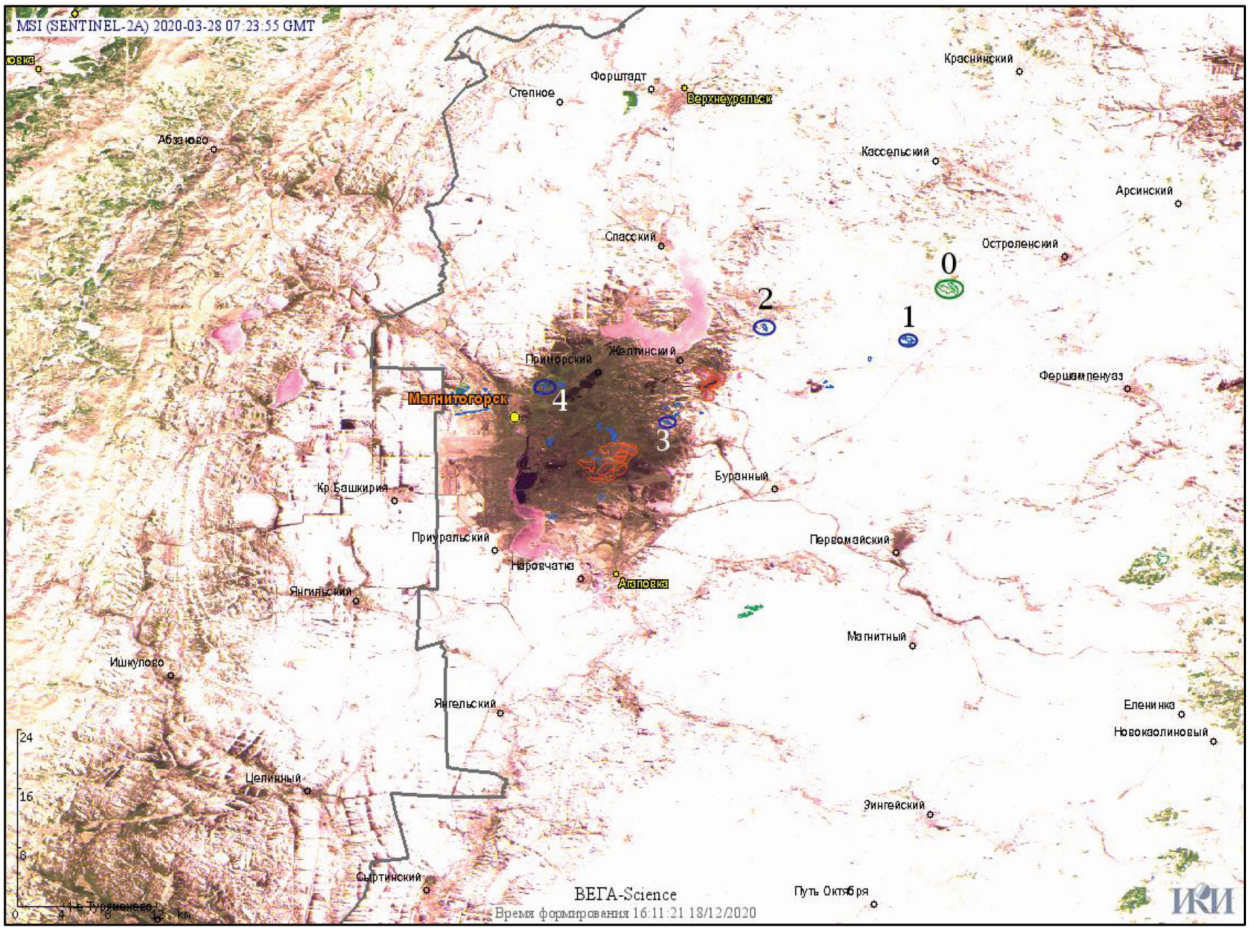

Рис. 7. Зона схода снежного покрова в конце марта 2020 г. по данным спутника Sentinel-2A и расположение участков, подвергаемых воздействию ИТОО. Участки 1, 2, 3, 4 — участки с преобладанием берёзы. Участок 0 —контрольный (эталонный) участок

На *рис. 7* также показаны участки, которые были выбраны для анализа состояния растительного покрова в районе наблюдаемого источника загрязнений, представляющие собой однородные участки леса с преобладанием берёзы:

- участок 1, расположенный в 30 км на северо-восток от Магнитогорска;
- участок 2, расположенный в 20 км на северо-восток от Магнитогорска;
- участок 3, расположенный в 9 км на северо-восток от Магнитогорска;
- участок 4, расположенный в 10 км на север от Магнитогорска.

В качестве контрольного (эталонного), т. е. не подвергнутого воздействию ИТОО, был выбран однородный участок берёзового леса, расположенный в 42 км на северо-восток от Магнитогорска. Многолетние ряды NDVI тестовых объектов в окрестности железорудного рудника «Малый Куйбас» «ОАО ММК» представлены на *рис. 8* (см. с. 254). На рисунке хорошо видна деградация на участках, находящихся в зоне загрязнения, по сравнению с участками, расположенными вне этой зоны, что отражается в многолетнем средних по вегетационному сезону падении значений NDVI.

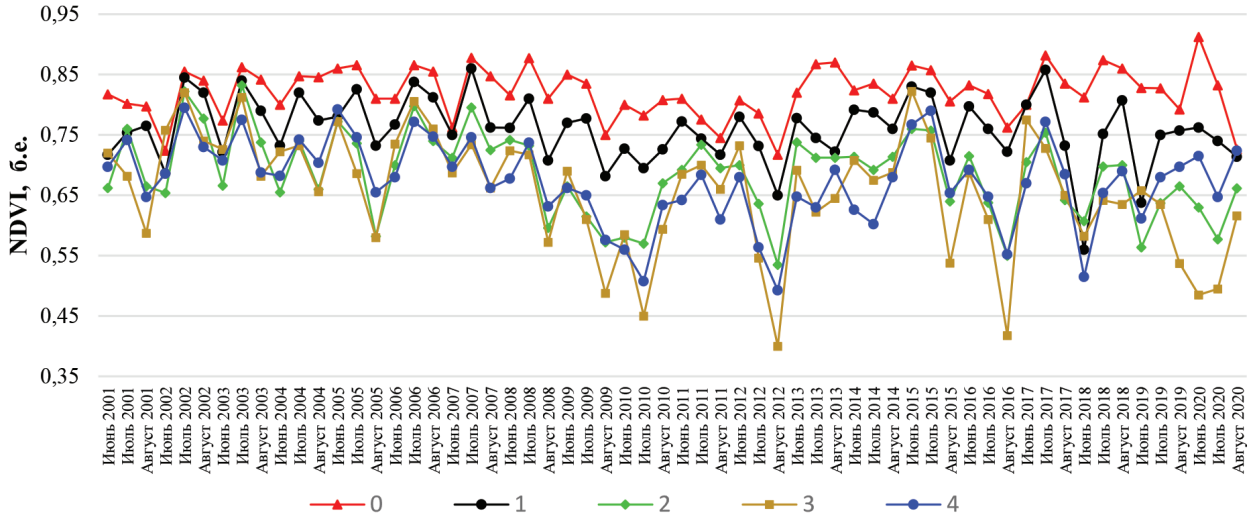

Рис. 8. Многолетние ряды NDVI однородных участков берёзы в окрестности железорудного рудника «Малый Куйбас» «ОАО ММК». 0 — контрольный (эталонный) участок; 1 — участок 1; 2 — участок 2; 3 — участок ; 4 — участок 4

Оценки влияния отвалов Качканарского ГОК на состояние растительного покрова по данным дистанционных спутниковых наблюдений

Данные спутникового дистанционного мониторинга отвалов Качканарского ГОКа на окружающую среду были использованы для сопоставления многолетних профилей NDVI однородных участков берёзы и сосны, находящихся в зонах и вне зон загрязнений ГОК. Для этого были выбраны однородные участки с преобладанием берёзы: участок 1 и участок 2, расположенные в 500 м от границы отвала Качканарского ГОКа; участок 3, расположенный в 3 км от автоотвала этого ГОКа, а также участок сосны 4, расположенный между карьером и железнодорожным и автомобильным отвалами (*рис. 9*).

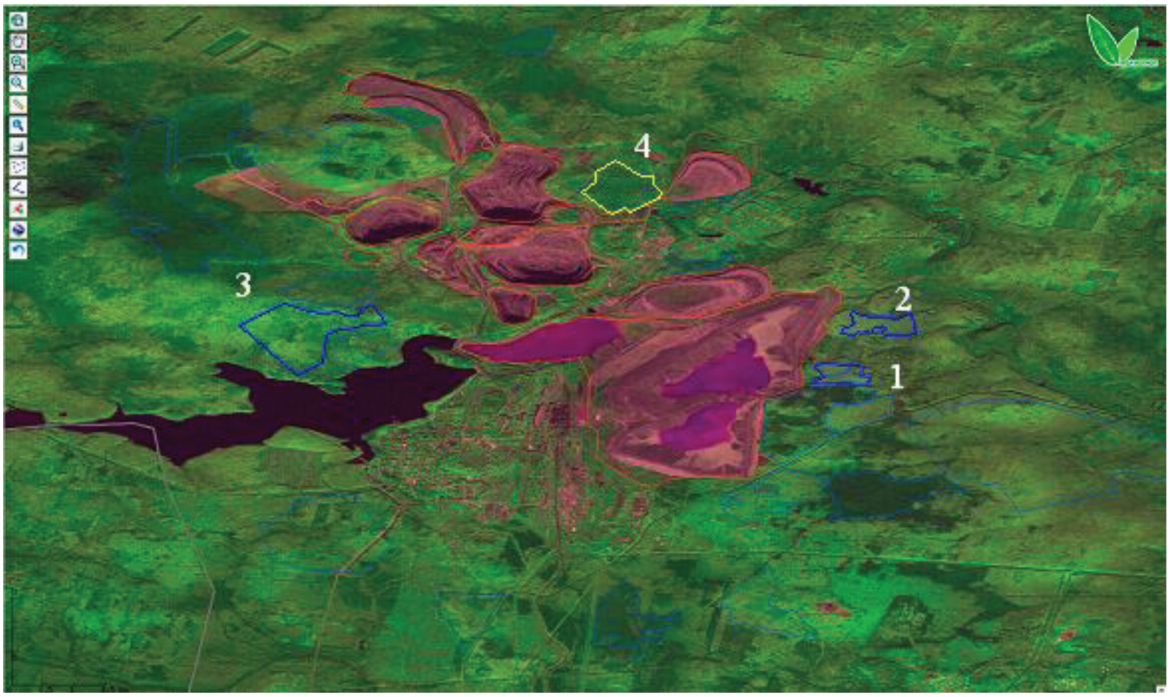

Рис. 9. Расположение участков, подвергаемых воздействию ИТОО:
1, 2, 3 — участки с преобладанием берёзы; 4 — участок с преобладанием сосны

В качестве контрольного (эталонного), т. е. не подвергнутого воздействию ИТОО, был выбран однородный участок с преобладанием берёзы, расположенный на 20 км южнее этого ГОКа. Возможность использования однородных участков сосны была протестирована по данным наблюдений участка 4, расположенного между карьером и железнодорожным и автомобильным отвалами. В качестве контрольного (эталонного) был выбран однородный участок с преобладанием сосны, расположенный на 30 км севернее Качканарского ГОКа.

Многолетние профили участков берёзы представлены на *рис. 10.* Важно отметить практически неизменные значения NDVI в период максимума вегетационного периода (июль – август) для контрольного (эталонного) участка, на который выбросы ИТОО Качканарского ГОКа практически не влияют. При этом на участках, подверженных влиянию загрязнений, наблюдается значительное уменьшение NDVI. Это, прежде всего, видно на участке 1, находящемся на расстоянии 500 м от границы отвала. Следует обратить внимание и на то, что деградация растительного покрова продолжается на протяжении всего периода наблюдений и не приостановлена и до настоящего времени.

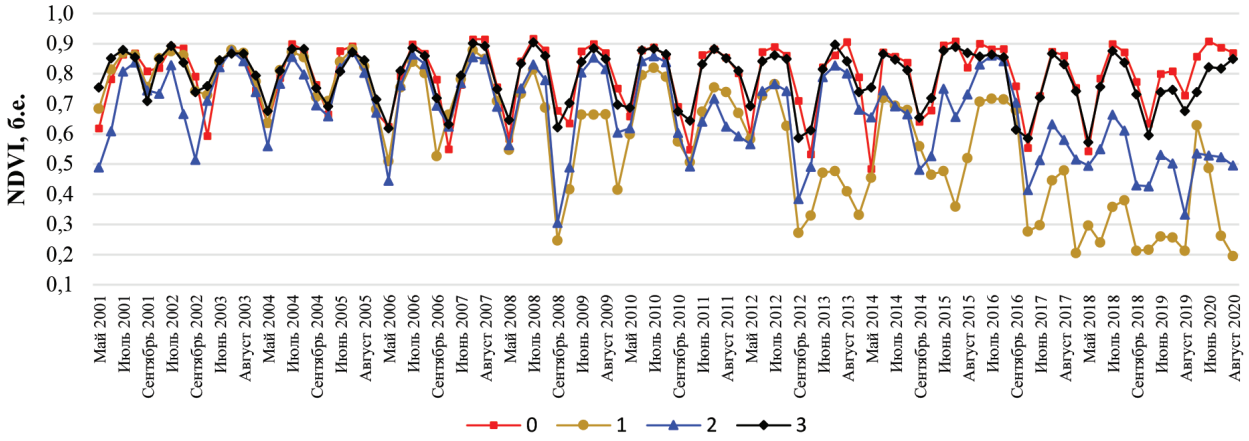

Рис. 10. Многолетние ряды NDVI однородных участков берёзы в окрестности Качканарского ИТОО. 0 — контрольный (эталонный) участок; 1 — участок 1; 2 — участок 2; 3 — участок 3

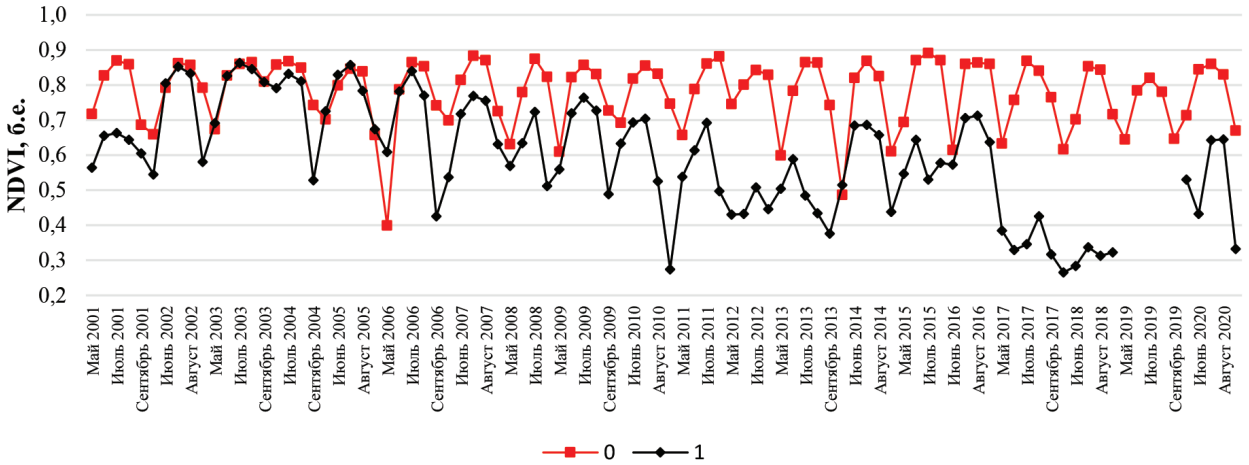

Рис. 11. Многолетние ряды NDVI однородных участков сосны в окрестности Качканарского ИТОО. 0 — контрольный (эталонный) участок; 1 — участок 4

Многолетние профили участков сосны представлены на *рис. 11.* И здесь отмечаются практически неизменные значения NDVI в период максимума вегетационного периода (июль – август) для контрольного (эталонного) участка, на который выбросы ИТОО

Качканарского ГОКа практически не влияют. При этом на участке 4, подверженном влиянию загрязнений, наблюдается значительное уменьшение NDVI. Здесь также следует обратить внимание на то, что деградация растительного покрова продолжается на протяжении всего периода наблюдений, в том числе в настоящее время.

Оценка влияния хвостохранилищ Талнахской обогатительной фабрики («Норникель») на природные водные объекты

Одним из важных вопросов мониторинга влияния хвостохранилищ на окружающую среду является оценка состояния этих хранилищ, обнаружения сбросов и/или утечек из них, в том числе и утечек, которые загрязняют реки и естественные водоёмы. Созданная подсистема, в частности, обеспечивает расчёт ряда спектральных индексов, которые описывают состояние водных объектов, в том числе присутствие в водоёмах загрязняющих веществ. Одним из таких индексов является AWEI1. Этот индекс рассчитывается по соотношению:

$$AWEI1 = 4(GREEN - SWIR1) - (0{,}25\,NIR + 2{,}75\,SWIR2),$$

где GREEN, NIR, SWIR1, SWIR2 —коэффициенты отражения водной поверхности в соответствующем спектральном диапазоне. Экспериментальным путём было установлено, что пики в значениях индекса соответствуют неестественному цвету (загрязнению) водного объекта.

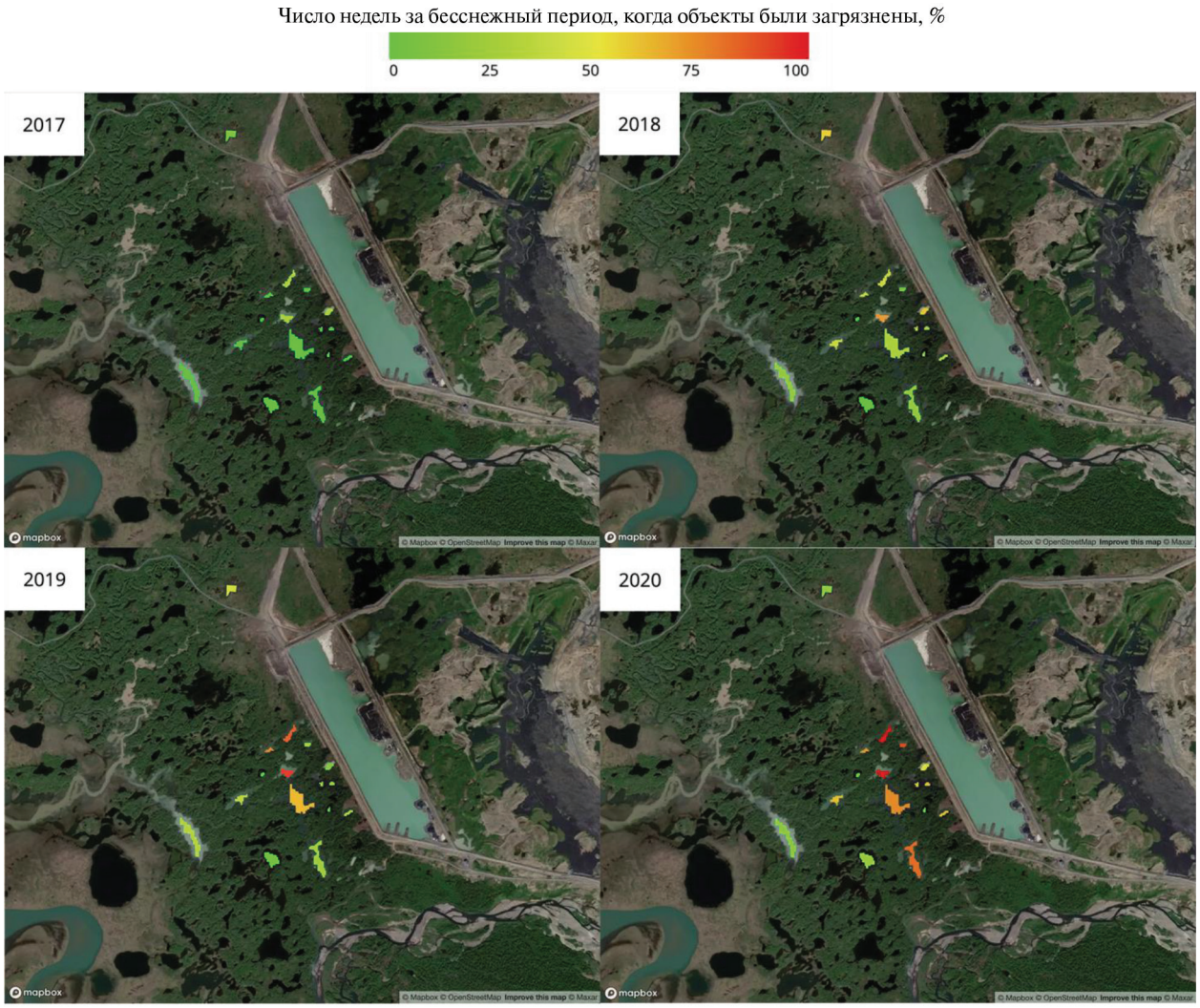

Рис. 12. Карта загрязнения водных объектов вокруг хвостохранилища «Новое» (2017–2020)

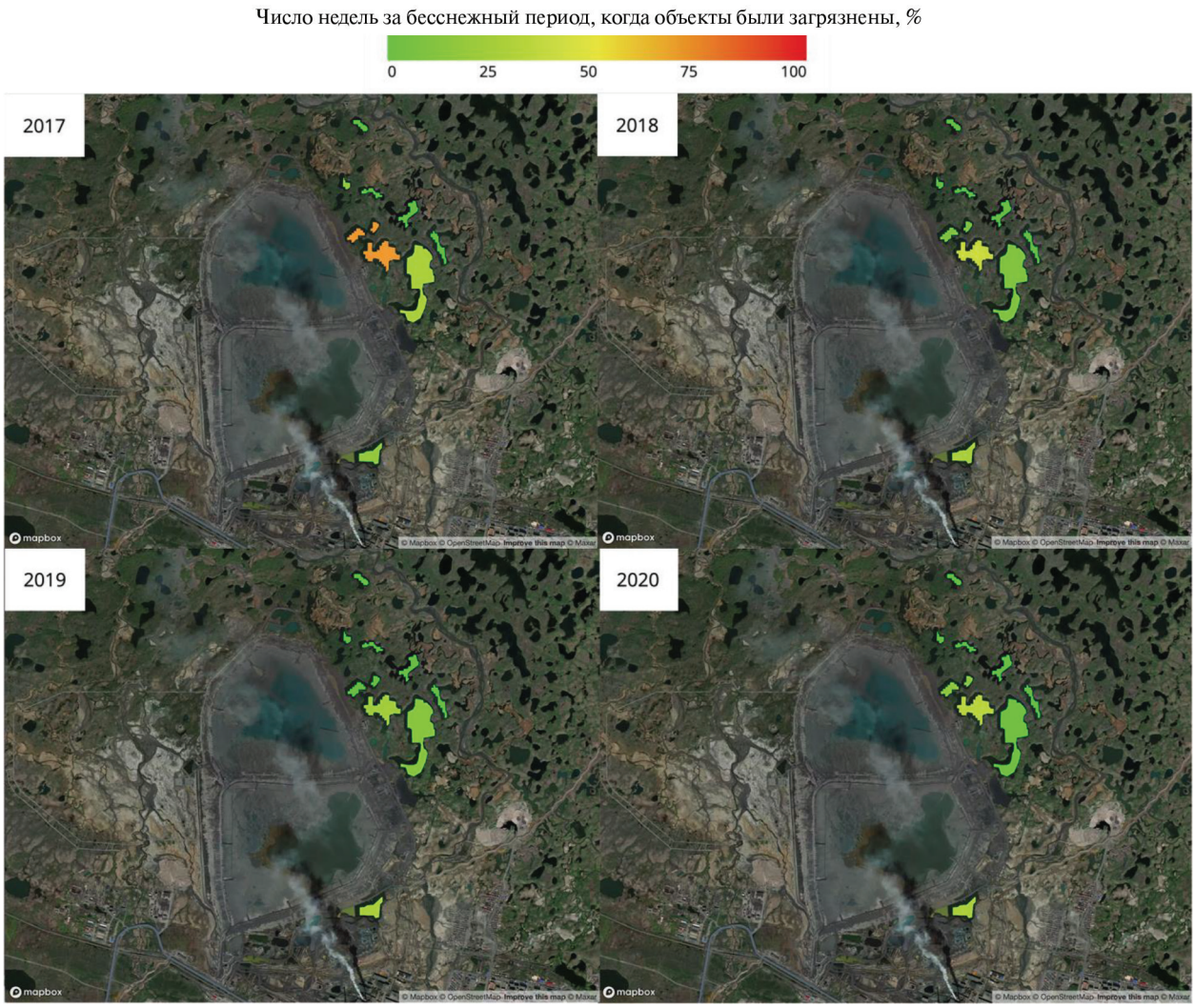

Рис. 13. Карта загрязнения водных объектов вокруг хвостохранилища «Лебяжье» (2017–2020)

При использовании данных, получаемых со спутников Sentinel-2, было установлено, что для определения того, является ли озеро загрязнённым, целесообразно выбрать порог, равный значению индекса 0,3. На *рис. 12* (см. с. 256) и *13* представлены данные по относительному числу недель, когда водные объекты вокруг хвостохранилищ были загрязнены по приведённому выше критерию, нормированному на длительность периода бесснежных наблюдений в период с 2017 по 2020 г. В результате работы были построены карты динамики сброса в озёра в окрестности хвостохранилищ («Новое» и «Лебяжье»), используемые для хранения отходов Талнахской обогатительной фабрики ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». При анализе представленных результатов следует учесть, что хвостохранилище «Новое» было построено в рамках модернизации Талнахской обогатительной фабрики в 2015–2017 гг., т. е. начало заполняться в 2017 г. При этом мощность Талнахской обогатительной фабрики возросла более чем на 30 %.

Представленные на *рис. 12* данные о загрязнённости окружающих водохранилище озёр указывают на нарастающий уровень их загрязнения в период с 2017 по 2020 г., что свидетельствует о необходимости принятия безотлагательных мер по приведению дамб этого хвостохранилища в надлежащее состояние, препятствующее поступлению загрязнений в водную систему в окрестности этого водохранилища. Существует также вероятность, что при проектировании или строительстве нового хвостохранилища допустили нарушения или ошибки, о чём свидетельствует монотонность возрастания степени загрязнений в районе «водосбросов» этого хвостохранилища.

В отличие от хвостохранилища «Новое» степень загрязнения естественных озёр от сбросов из хвостохранилища «Лебяжье» не изменяется монотонно из года в год (см. *рис. 13*). В результате анализа данных, приведённых на *рис. 12* и *13*, можно сделать основной вывод, что если в районе «Лебяжьего» за последние годы ситуация практически не изменилась, то в районе «Нового» ситуация значительно ухудшилась.

Заключение

Таким образом, мы видим, что созданный набор инструментов сбора и анализа данных спутникового мониторинга позволяет решать разнообразные задачи, связанные с изучением и мониторингом влияния крупных промышленных источников загрязнения, в том числе и ИТОО, на окружающую среду. При этом важно отметить, что данный инструмент позволяет как проводить ретроспективный анализ различных районов загрязнений, так и вести их постоянный оперативный мониторинг. При этом инструмент достаточно гибкий и позволяет при проведении исследования конкретного района определять необходимый состав контролируемых параметров и осуществлять их постоянный мониторинг.

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

Литература

1. *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.
2. *Горный В. И.*, *Крицук С. Г.*, *Латыпов И. Ш.*, *Храмцов В. Н.* Верификация крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 201–212.
3. *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.
4. *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.
5. *Зеньков И. В.*, *Заяц В. В.*, *Нефедов Б. Н.*, *Юронен Ю. П.*, *Вокин В. Н.*, *Кирюшина Е. В.*, *Логинова Е. В.*, *Кондрашов П. М.*, *Раевич К. В.*, *Маглинец Ю. А.*, *Конов В. Н.*, *Афанасов В. И.*, *Федоров А. Б.*, *Перфильев Д. А. Спирин Т. С.* Угольные разрезы России из космоса. Горные работы и экология нарушенных земель: монография / Российская академия наук, Сибирское отд-ние; Сибирский федеральный ун-т; Сибирский гос. ун-т науки и технологий им. М. Ф. Решетнева; Институт вычислительных технологий. Красноярск: СФУ, 2017. 518 с.
6. *Зеньков И. В.*, *Заяц В. В.*, *Нефедов Б. Н.*, *Юронен Ю. П.*, *Морин А. С.*, *Вокин В. Н.*, *Кирюшина Е. В.*, *Кондрашов П. М.*, *Раевич К. В.*, *Маглинец Ю. А.*, *Конов В. Н.*, *Афанасов В. И.*, *Федоров А. Б.*, *Латынцев А. А.*, *Спирин Т. С.* Железорудные карьеры России из космоса. Горные работы и экология нарушенных земель: монография / М-во образования и науки Российской Федерации; Ин-т вычислительных технологий СО РАН;, Сибирский федеральный ун-т; Сибирский гос. ун-т науки и технологий им. М. Ф. Решетнёва. Красноярск: СФУ, 2018. 664 с.
7. *Калабин Г. В.*, *Горный В. И.*, *Крицук С. Г.* Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению Сорского медно-молибденового месторождения // Физико-технич. проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 1. С. 153–161.
8. *Калабин Г. В.*, *Горный В. И.*, *Давидан Т. А.*, *Крицук С. Г.*, *Тронин А. А.* Восстановление тундровой экосистемы после закрытия рудника «Валькумей» на Чукотке // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 146–153.
9. *Кобец Д. А.*, *Матвеев А. М.*, *Прошин А. А.*, *Мазуров А. А.* Контроль работоспособности и управление распределенными комплексами автоматической потоковой обработки спутниковых данных // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. Приложение за 2017 г.: Материалы 5-й междуна-

родной научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». 2018. С. 225–234. URL: http://www.vniiem.ru/ru/uploads/files/conferences/170525/materialy_2017.pdf.

10. *Константинова А. М.*, *Балашов И. В.*, *Кашницкий А. В.*, *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Сенько К. С.*, *Сычугов И. Г.* Организация подсистем работы с наблюдениями объектов в сервисах, работающих по технологии GEOSMIS // 18-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва. 16–20 нояб. 2020. М.: ИКИ РАН, 2020. С. 82. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
11. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Кашницкий 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.
12. *Прошин А. А.*, *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Кашницкий А. В.*, *Бурцев М. А.* Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
13. *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.
14. *Титов А. Ф.*, *Таланова В. В.*, *Казнина Н. М.*, *Лайдинен Г. Ф.* Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. 170 с.
15. *Титов А. Ф.*, *Казнина Н. М.*, *Таланова В. В.* Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2014. 194 с.
16. *Толпин В. А.*, *Балашов И. В.*, *Ефремов В. Ю.*, *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Уваров И. А.*, *Флитман Е. В.* Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 93–108.
17. *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.
18. *Kashnitskii A. V.*, *Lupyan E. A.*, *Balashov I. V.*, *Konstantinova A. M.* Technology for designing tools for the process and analysis of data from very large scale distributed satellite archives // Atmospheric and Oceanic Optics. 2017. V. 30. Iss. 1. P. 84–88.
19. *Krupa S. G.*, *Arndt U.* Special Issue on the Hohenheim Long Term Experiment // Environmental pollution. 1990. V. 68. P. 193–478.
20. Metals from the Forest. World Conservation Union (IUCN) and World Wide Fund for Nature (WWF). Gland, Switzerland, 1999. 40 p.
21. *Running S.*, *Mu Q.*, *Zhao M.* MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2017. DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.006.

Development of a system for analyzing the state of environment in areas of large industrial facilities, tailings and dumps

E. A. Loupian[1], A. M. Konstantinova[1], I. V. Balashov[1], A. V. Kashnitskii[1], V. P. Savorskiy[2], O. Yu. Panova[2]

[1] *Space Research Institute RAS, 117997 Moscow, 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 paper discusses the possibility of organizing continuous remote monitoring of areas affected by sources of technogenic waste and dumps (TWDS). A subsystem for working with remote monitoring data, designed to solve these problems, created on the basis of the IKI-Monitoring Center for Collective Use is presented. The features of the construction of this subsystem are described, software-algorithmic solutions are proposed and implemented, and its current capabilities are presented. The created set of tools for collecting and analyzing satellite monitoring data makes it possible to solve quite diverse tasks related to the study and monitoring of the impact of large industrial pollution sources, including TWDS, on the environment. The subsystem includes tools for both retrospective analysis of various areas with TWDS and for their constant operational monitoring. The feasibility and efficiency of the subsystem is confirmed by examples of its use for the organization of remote sensing of zones of potential contamination from TWDS, including the ability to analyze long-term changes occurring in various plant and water bodies located in these zones.

Keywords: technogenic waste, dumps, remote sensing, plant objects, water objects, control plots, spectral index, "IKI-Monitoring" Center for Collective Use

Accepted: 20.12.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-243-261

References

1. Buznikov A. A., Timofeev A. A., Regional'nyi ekologicheskii monitoring: metod i apparatno-programmnyi kompleks dlya distantsionnoi otsenki zagryazneniya indikatornykh vidov rastitel'nosti tyazhelymi metallami (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.
2. Gornyi V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Khramtsov V. N., Verifikatsiya krupnomasshtabnykh kart termodinamicheskogo indeksa narushennosti ekosistem (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.
3. Gornyi V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Termodinamicheskii podkhod k sputnikovomu kartirovaniyu nakoplennogo ekologicheskogo ushcherba lesnykh ekosistem (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.
4. Grigorieva O. V., Drozdova I. V., Shilin B. V., Eksperimental'noe obosnovanie vozmozhnostei videospektral'noi distantsionnoi indikatsii kratkovremennogo stressa rastitel'nosti (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.
5. Zenkov I. V., Zayats V. V., Nefedov B. N., Yuronen Yu. P., Vokin V. N., Kiryushina E. V., Loginova E. V., Kondrashov P. M., Raevich K. V., Maglinets Yu. A., Konov V. N., Afanasov V. I., Fedorov A. B., Perfil'ev D. A., Spirin T. S., *Ugol'nye razrezy Rossii iz kosmosa. Gornye raboty i ekologiya narushennykh zemel'* (Coal mines of Russia from space. Mining and ecology of disturbed lands), Krasnoyarsk: SFU, 2017, 518 p.
6. Zenkov I. V., Zayats V. V., Nefedov B. N., Yuronen Yu. P., Morin A. S., Vokin V. N., Kiryushina E. V., Kondrashov P. M., Raevich K. V., Maglinets Yu. A., Konov V. N., Afanasov V. I., Fedorov A. B., Latyntsev A. A. Spirin T. S., *Zhelezorudnye kar'ery Rossii iz kosmosa. Gornye raboty i ekologiya narushennykh ze-*

mel' (Iron ore quarries of Russia from space. Mining and ecology of disturbed lands), Krasnoyarsk: SFU, 2018, 664 p.

7. Kalabin G. V., Gornyi V. I., Kritsuk S. G., Satellite monitoring of vegetation mantle response to the Sorsk copper-molybdenum mine impact, *J. Mining Science*, 2014, Vol. 50, No. 1, pp. 155–162.
8. Kalabin G. V., Tronin A. A., Gornyi V. I., Davidan T. A., Kritsuk S. G., Recovery of tundra ecosystem after closure of the valkumei mine in chukotka, *J. Mining Science*, 2018, Vol. 54, No. 2, pp. 315–322.
9. Kobets D. A., Matveev A. M., Proshin A. A., Mazurov A. A., Kontrol' rabotosposobnosti i upravlenie raspredelennymi kompleksami avtomaticheskoi potokovoi obrabotki sputnikovykh dannykh (Operation control and management of distributed complexes of automatic streaming processing of satellite data), *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM. Prilozhenie za 2017 g. Materialy 5-i mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli"* (Materials of the 5th international scientific and technical conf. "Actual problems of creation of space remote sensing systems of the Earth"), Electromechanical matters, VNIIEM studies, 2018, pp. 225–234, available at: http://www.vniiem.ru/ru/uploads/files/conferences/170525/materialy_2017.pdf.
10. Konstantinova A. M., Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Proshin A. A., Senko K. S., Sychugov I. G., Organizatsiya podsistem raboty s nablyudeniyami ob″ektov v servisakh, rabotayushchikh po tekhnologii GEOSMIS (Organization of subsystems for working with observations of objects in services using GEOSMIS technology), *18-ya Vserossiiskaya Otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (18th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of abstr., Moscow, 16–20 Nov., Moscow: IKI RAN, 2020, p. 82, DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
11. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskiiy 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., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TsKP "IKI-Monitoring") (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, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
12. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Burtsev M. A., Sozdanie unifitsirovannoi sistemy vedeniya arkhivov sputnikovykh dannykh, prednaznachennoi dlya postroeniya sovremennykh sistem distantsionnogo monitoringa (Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 9–27, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
13. Savorskii V. P., Loupian E. A., Gornyi V. I., Ermakov D. M., Panova O. Yu., Konstantinova A. M., Metody i instrumenty analiza dannykh DZZ dlya vyyavleniya izmenenii rastitel'nogo pokrova, vyzvannykh tekhnogennymi otkhodami i otvalami (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, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-31-47.
14. Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M., Laidinen G. F., *Ustoichivost' rastenii k tyazhelym metallam* (Plant resistance to heavy metals), Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2007, 170 p.
15. 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.
16. Tolpin V. A., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Proshin A. A., Uvarov I. A., Flitman E. V., Sozdanie interfeisov dlya raboty s dannymi sovremennykh sistem distantsionnogo monitoringa (sistema GEOSMIS) (The GEOSMIS System: Developing Interfaces to Operate Data in Modern Remote Monitoring Systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 93–108.
17. 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.
18. Kashnitskii A. V., Lupyan E. A., Balashov I. V., Konstantinova A. M., Technology for designing tools for the process and analysis of data from very large scale distributed satellite archives, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017, Vol. 30, Issue 1, pp. 84–88.
19. Krupa S. G., Arndt U., Special Issue on the Hohenheim Long Term Experiment, *Environmental Pollution*, 1990, Vol. 68, pp. 193–478.
20. *Metals from the Forest*, World Conservation Union (IUCN) and World Wide Fund for Nature (WWF), Gland, Switzerland, 1999, 40 p.
21. 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.