

# Информационная инфраструктура многолетнего спутникового мониторинга зон, подверженных влиянию источников техногенных отходов и отвалов

**Константинова Анна Михайловна (1)**

**Лупян Евгений Аркадьевич (1)**

**Панова О.Ю (2,1)**

**Саворский В.П. (2,1)**

(1) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

(2) Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Фрязино, Россия



# Актуальность

- ✓ Горнодобывающая промышленность является одним наиболее значимых источников загрязнений, оказывающих длительное и разрушительное воздействие на окружающую среду
- ✓ Токсичность отвалов и хвостохранилищ и всё больше возрастающие их объёмы
- ✓ Инструменты контроля должны быть независимыми и масштабными с точки зрения территории
- ✓ Дистанционный мониторинг должен быть многолетним для оценки процессов, влияющих на деградацию прилегающих территорий

# Задача

Организация мониторинга воздействия источников техногенных отходов и отвалов (ИТОО) на прилегающие территории на основе многолетних рядов спутниковых данных различного пространственного разрешения.

Такой мониторинг возможен с помощью автоматизированной подсистемы наблюдений за природными и природно-антропогенными объектами **Object Surveys**, разработанной в ИКИ РАН и интегрированной в семейство систем «Созвездие-Вега» (<http://sozvezdie-vega.ru/>).

# Основные факторы загрязнений от ИТОО

Пылевые и газообразные загрязнители (тяжелые металлы: свинец, кадмий, и т.п.)

Газообразные загрязнители (например,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ )

Жидкокапельные загрязнители (кислотные дожди, туманы и росы)

Дождевой дренаж (дефицит минералов в почве, зачастую вызываемый кислотными дождями)

Гидрология (наземный и подземный кислый дренаж)

# Объекты контроля влияния ИТОО

- Участки растительности



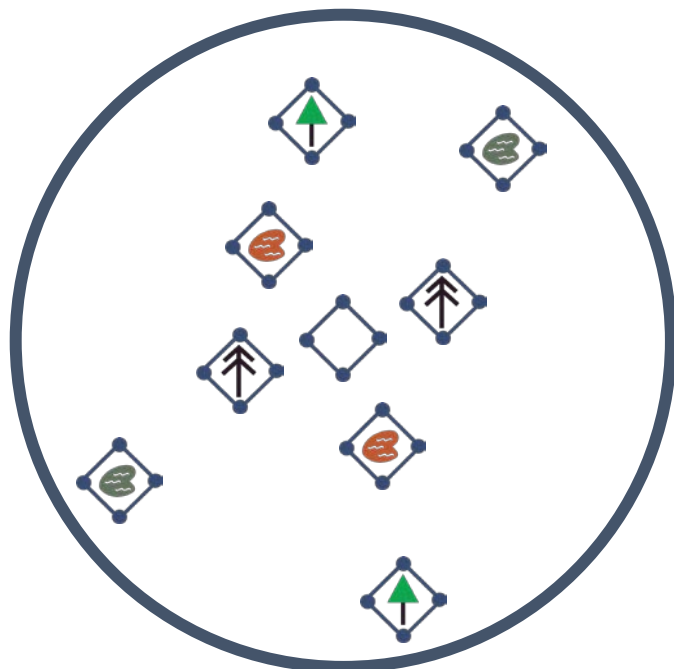
- Водные объекты








# Инструмент мониторинга объектов в информационной системе Vega-Science



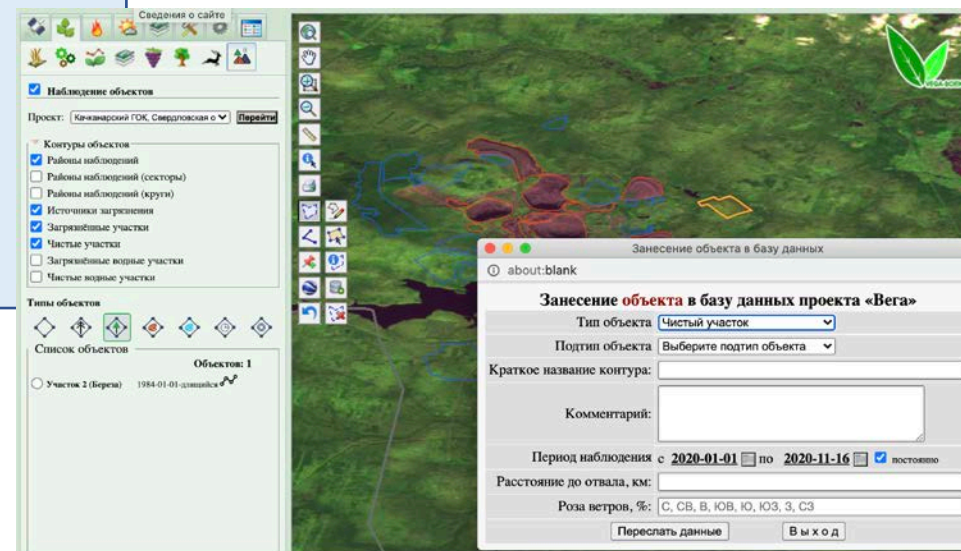
Заводится исследовательский проект (горнодобывающее предприятие) с районом наблюдения, в центре которого находится источник загрязнения (отвал, хвостохранилище и тп). Внутри района наблюдения заносятся потенциально "загрязнённые" и контрольные ("чистые") участки различного типа. Для каждого участка рассчитывается в зависимости от типа объекта свой набор показателей (спектральных индексов) по всем сценам спутниковых данных, имеющимся в архивах



## Типы объектов

-  - источник загрязнения
-  - загрязнённый участок растительности
-  - чистый участок растительности
-  - загрязнённый водный объект
-  - чистый водный объект

*Занесение объекта контроля в картографическом интерфейсе системы Vega-Science*



MSI (SENTINEL-2A) 2020-09-27 07:33:28 GMT



BEGA-Science

Время формирования 17:45:42 15/11/2020



MSI (SENTINEL-2A) 2020-09-06 06:19:41 GMT



BEGA-Science

Время формирования 17:54:50 15/11/2020

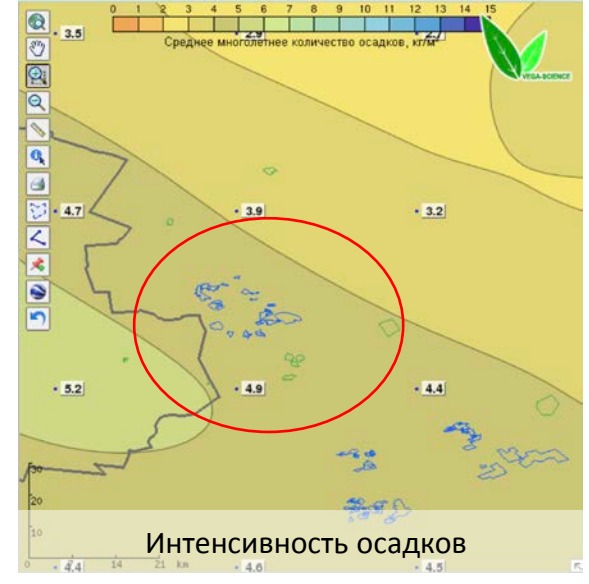
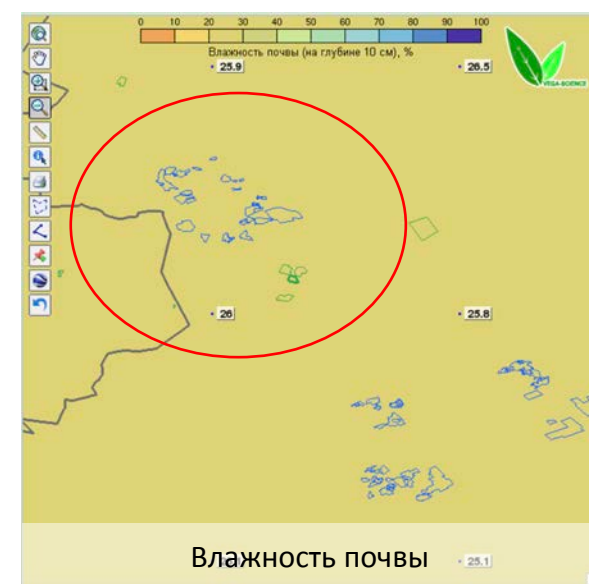
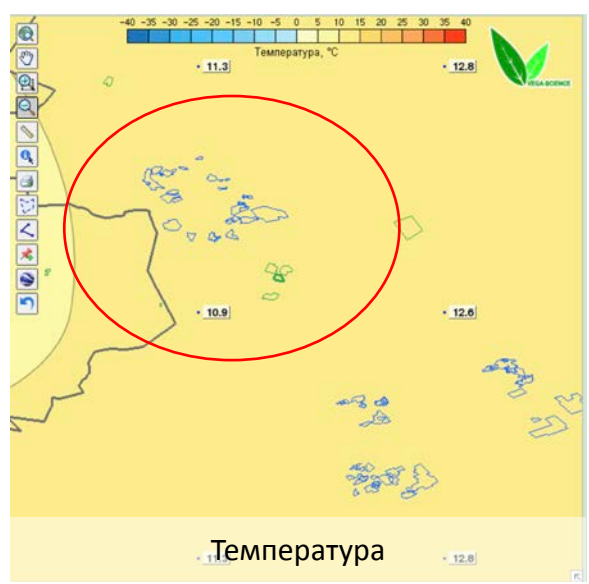
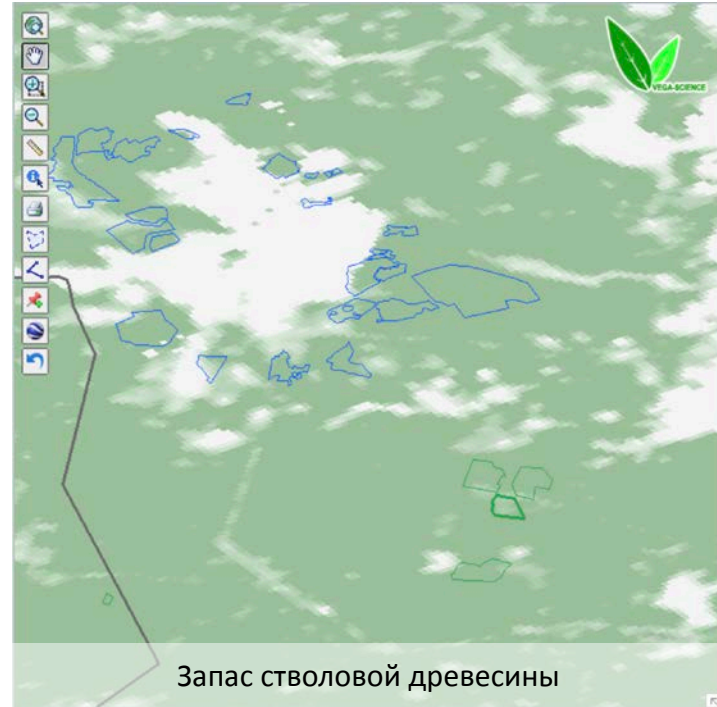
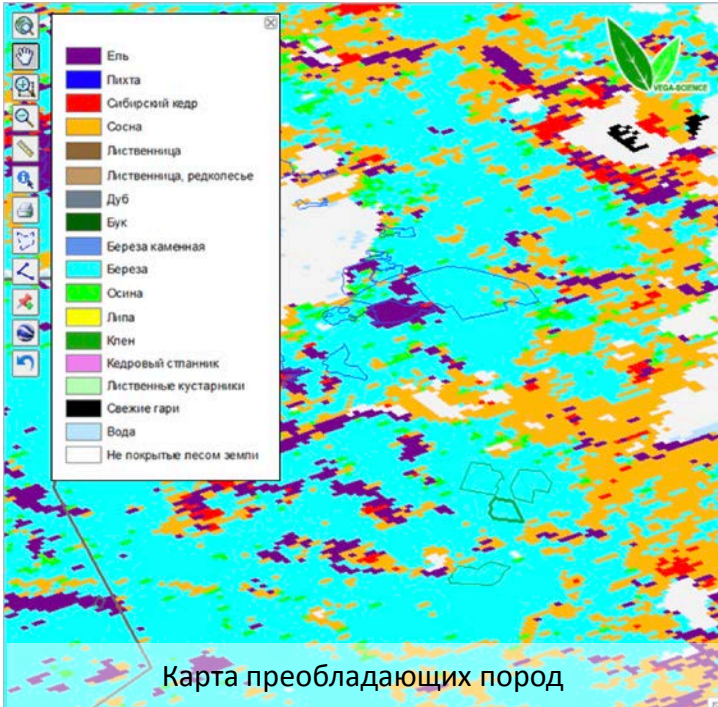
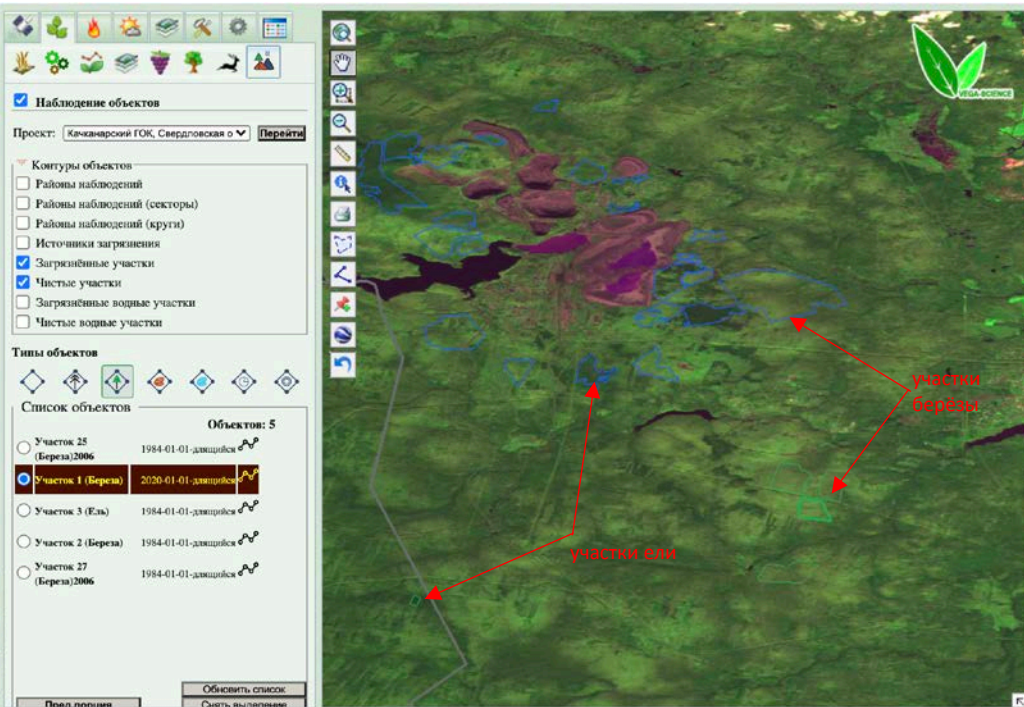


## Требования к объектам контроля

Участки леса в окрестности отдельных ИТОО должны:

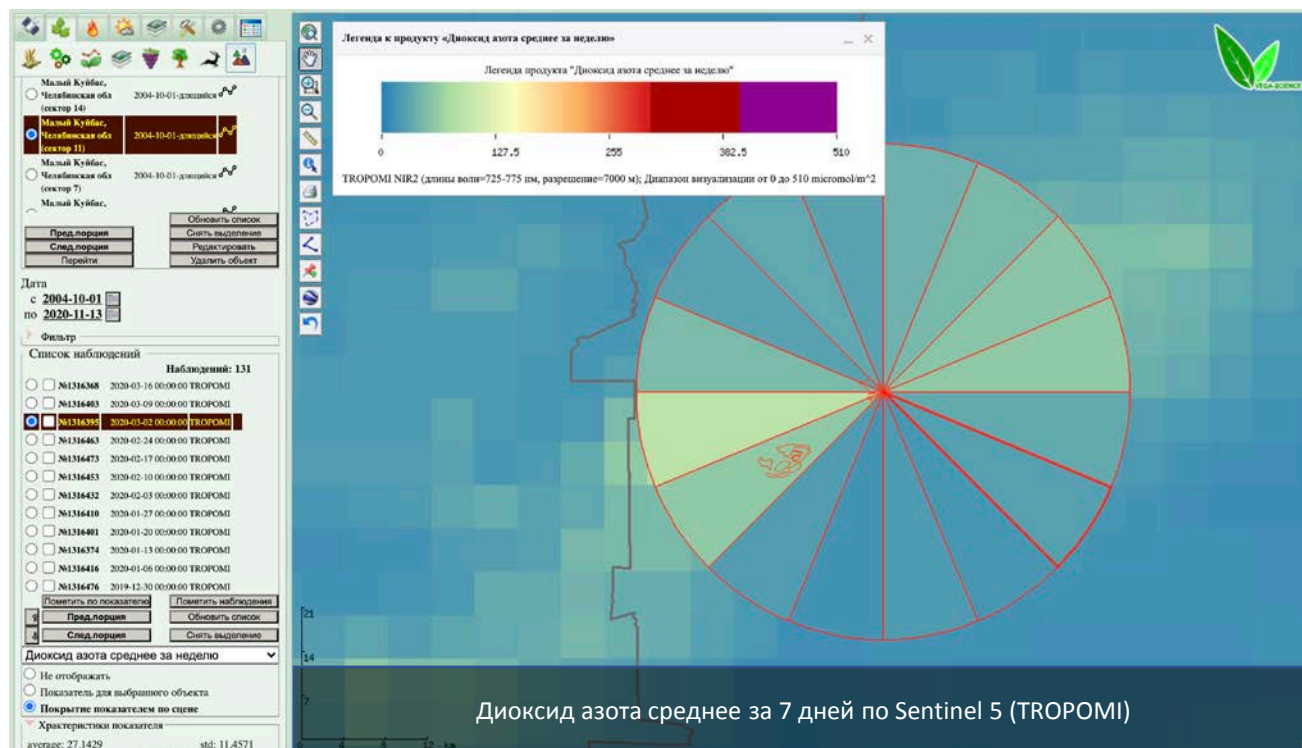
- быть близкими по таксономии (основные породы, запас, бонитет)
- иметь схожие погодно-климатическими характеристиками (температура, влажность воздуха, влажность почвы, скорость и направление ветра).
- распределение участков на потенциально "загрязнённые" и контрольные ("чистые") должно происходить с учетом розы ветров и удаленности их от ИТОО





# Объект: «Район наблюдений (секторы, кольца)»

№	Показатель	Источник данных для расчетов	Тип показателя
1	Аэрозольный индекс среднее за 7 дней	Аэрозольный индекс среднее за 7 дней по Sentinel 5	вычисленный
2	Диоксид азота среднее за 7 дней	Диоксид азота среднее за 7 дней по Sentinel 5	вычисленный
3	Угарный газ среднее за 7 дней	Угарный газ среднее за 7 дней по Sentinel 5	вычисленный



Для районов наблюдений показатели рассчитываются секторально и внутри колец, отдаляющихся от центра - источника загрязнения. Такое разбиение позволяет анализировать розу ветров.

# Объект: «Источник наблюдений»

№	Показатель	Источник данных для расчетов	Тип показателя
1	Аэрозольный индекс среднее за 7 дней	Аэрозольный индекс среднее за 7 дней по Sentinel 5	реальный
2	Диоксид азота среднее за 7 дней	Диоксид азота среднее за 7 дней по Sentinel 5	реальный
3	Угарный газ среднее за 7 дней	Угарный газ среднее за 7 дней по Sentinel 5	реальный
4	NDVI ежедневный	Ежедневный каналный MODIS	виртуальный
5	PVI ежедневный	Ежедневный каналный MODIS	виртуальный
6	NDVI 7-дневный	NDVI интерполированный 7-дневный (MODIS)	реальный
7	PVI 7-дневный	PVI интерполированный 7-дневный (MODIS)	реальный
8	NDVI	Канальные данные Sentinel 2, Landsat	виртуальный
9	AWEI1	Канальные данные Sentinel 2, Landsat	виртуальный
10	AWEI2	Канальные данные Sentinel 2, Landsat	виртуальный

# Объект: «Чистый/загрязнённый участок растительности»

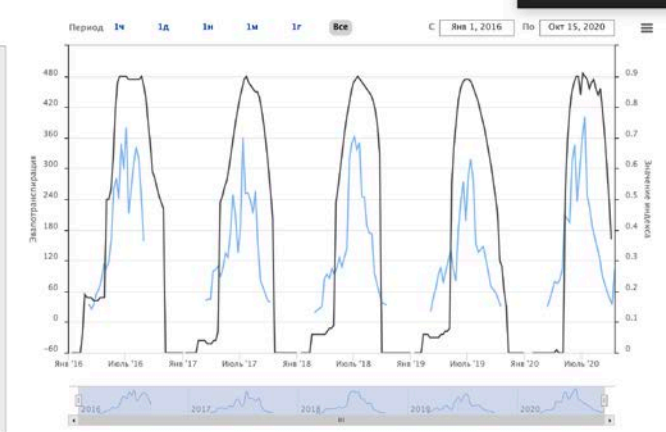
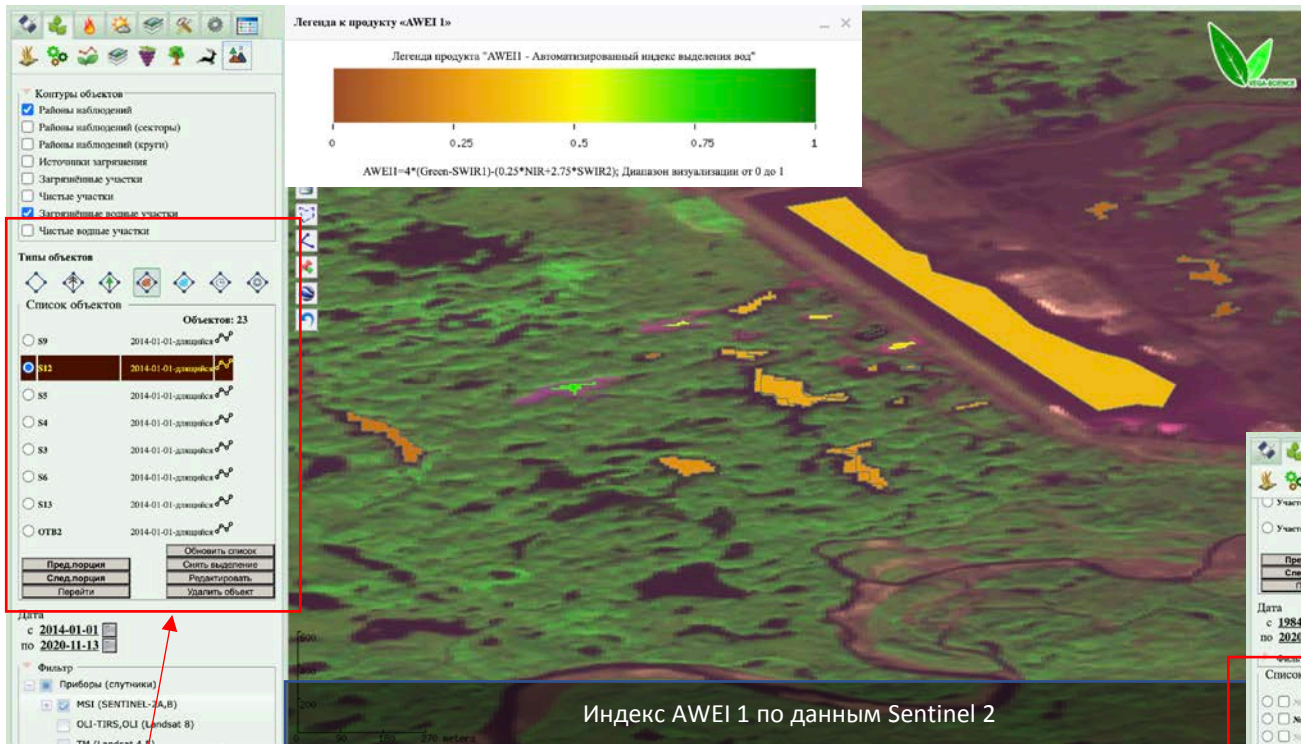
№	Показатель	Источник данных для расчетов	Тип показателя
1	Эвапотранспирация	7-дневное среднее (MODIS)	реальный
2	ПЭВ темнохвойный	7-дневное среднее (MODIS)	реальный
3	ПЭВ смешанный	7-дневное среднее (MODIS)	реальный
4	ПЭВ лиственный	7-дневное среднее (MODIS)	реальный
5	ПЭВ светлохвойный	7-дневное среднее (MODIS)	реальный
6	ПЭВ листопадный	7-дневное среднее (MODIS)	реальный
7	NDVI ежедневный	Ежедневный каналный MODIS	виртуальный
8	PVI ежедневный	Ежедневный каналный MODIS	виртуальный
9	NDVI 7-дневный	NDVI интерполированный 7-дневный (MODIS)	реальный
10	PVI 7-дневный	PVI интерполированный 7-дневный (MODIS)	реальный
11	NDVI	Канальные данные Sentinel 2, Landsat	виртуальный

# Объект: «Чистый/загрязнённый водный объект»

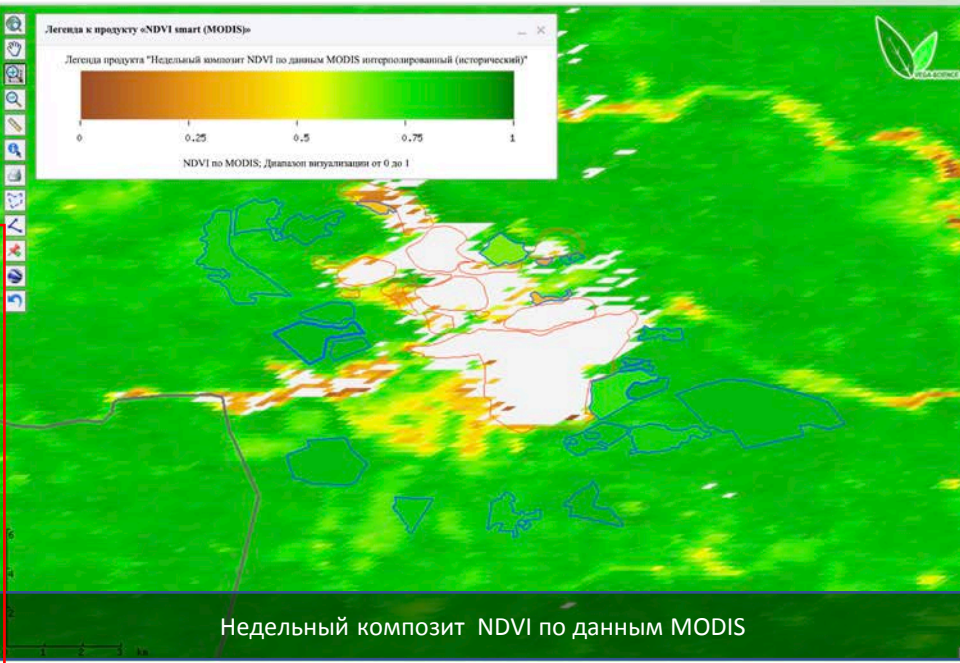
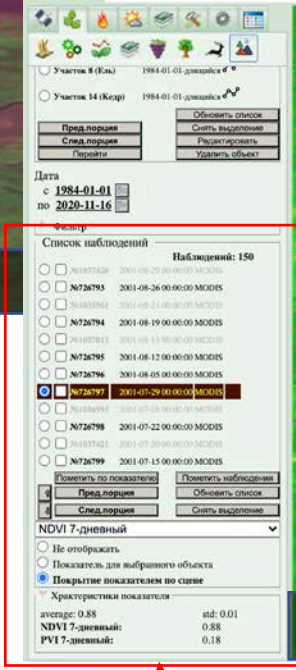
№	Показатель	Выражение	Источник данных для расчетов	Тип показателя
1	AWEI1	$4 \times (\text{GREEN} - \text{SWIR1}) - (0,25 \times \text{NIR} + 2,75 \times \text{SWIR2})$	Канальные данные Sentinel 2 , Landsat	виртуальный
2	AWEI2	$\text{BLUE} + 2.5 \times \text{GREEN} - 1.5 \times (\text{NIR} + \text{SWIR1}) - 0.25 \times \text{SWIR2}$	Канальные данные Sentinel 2 , Landsat	виртуальный
3	NDWI	$(\text{GREEN} - \text{NIR}) / (\text{GREEN} + \text{NIR})$	Канальные данные Sentinel 2 , Landsat	виртуальный
4	WRI	$(\text{GREEN} + \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{SWIR1})$	Канальные данные Sentinel 2 , Landsat	виртуальный
5	MNDWI	$(\text{GREEN} - \text{SWIR1}) / (\text{GREEN} + \text{SWIR1})$	Канальные данные Sentinel 2 , Landsat	виртуальный
6	NDMI	$(\text{NIR} - \text{SWIR1}) / (\text{NIR} + \text{SWIR1})$	Канальные данные Sentinel 2 , Landsat	виртуальный

Название	Номер канала	Диапазон нм	Номер канала	Диапазон нм
	Landsat 8 (OLI)		Sentinel 2 (MSI)	
BLUE	B2	450-510	B2	456-523
GREEN	B3	530-590	B3	542-577
RED	B4	640-670	B4	650-680
NIR	B5	850-880	B8	785-900
SWIR1	B6	1570-1630	B11	1565-1655
SWIR2	B7	2110-2290	B12	2100-2280

# Визуализация рассчитанных показателей на карте и графиках



Список объектов контроля



Список наблюдений объекта (сцены спутниковых данных, по которым производился расчёт)

# Качканар. Сравнение участков растительности



Качканарский горно-обогатительный комбинат - единственный в мире горно-обогатительный комбинат, выпускающий железованадиевый концентрат, агломерат и окатыши, используемые в доменной плавке. Главным рудным минералом является магнетит в виде вкрапленности до 90 % объёма рудной части. Хвосты мокрой магнитной сепарации объёмом свыше 40 млн т в год по хвостопроводам в виде пульпы передаются на насосную станцию цеха хвостового хозяйства. Хвосты мокрой магнитной сепарации в виде пульпы с содержанием твёрдого около 10 % по пульповодам перекачиваются в хвостохранилище. Здесь производится складирование хвостов, а в прудах отстойниках происходит осветление воды, которая затем используется в качестве оборотной в процессе обогащения и в других технологических целях.

**O1, O2, O4** – загрязненные, лиственный лес, береза. **O** – загрязненный участок, сосна.

**O1, O4** расположены в 500 м от границы хвостохранилища Качканарского ГОКа.

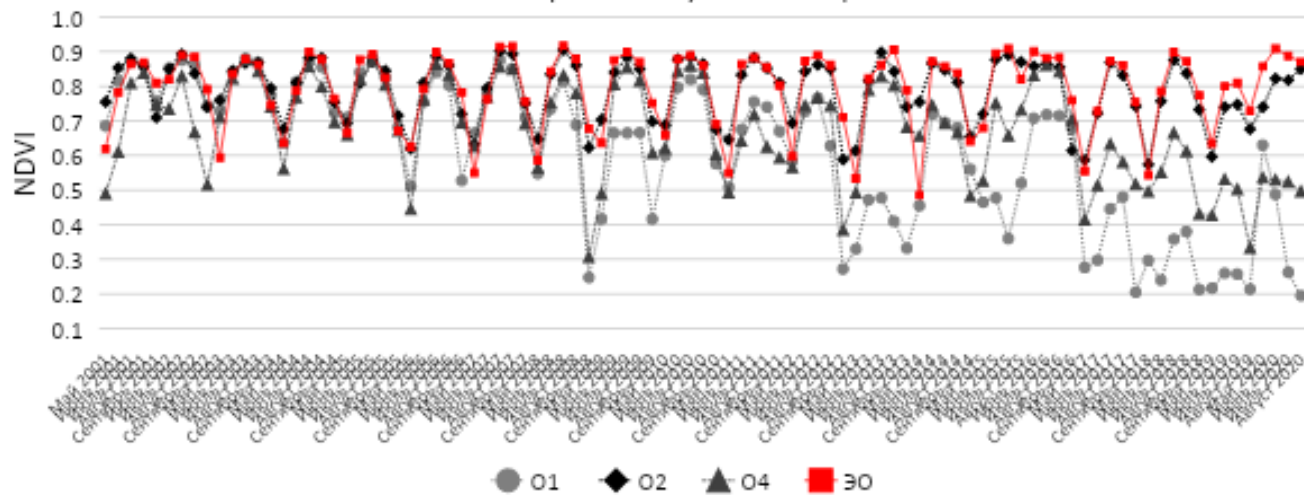
**O2** расположен в 3 км от автоотвала Качканарского ГОКа. Эталонный объект расположен на 20 км южнее Качканарского ГОКа.

На **O1, O4** видны изменения с 2011 года, на **O2** изменений нет.

**O0** - эталонный (незагрязненный) участок. (ЭО березы в 30 км южнее, ЭО сосны в 30 км севернее).

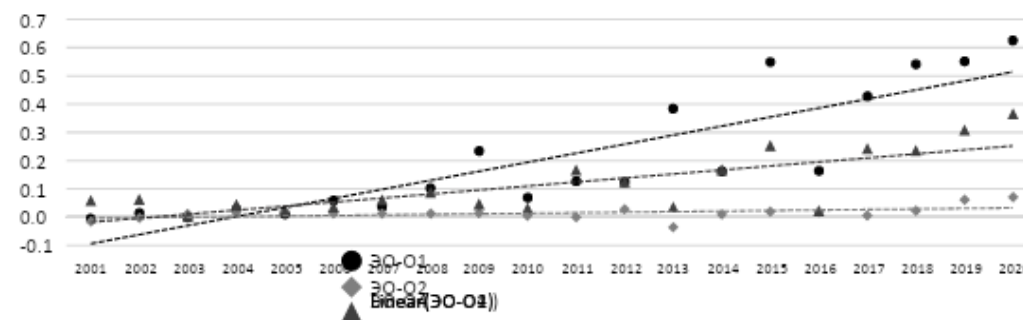
# Качканар. Сравнение участков растительности по NDVI интерполированному 7-дневному (MODIS)

Сравнение участков березы

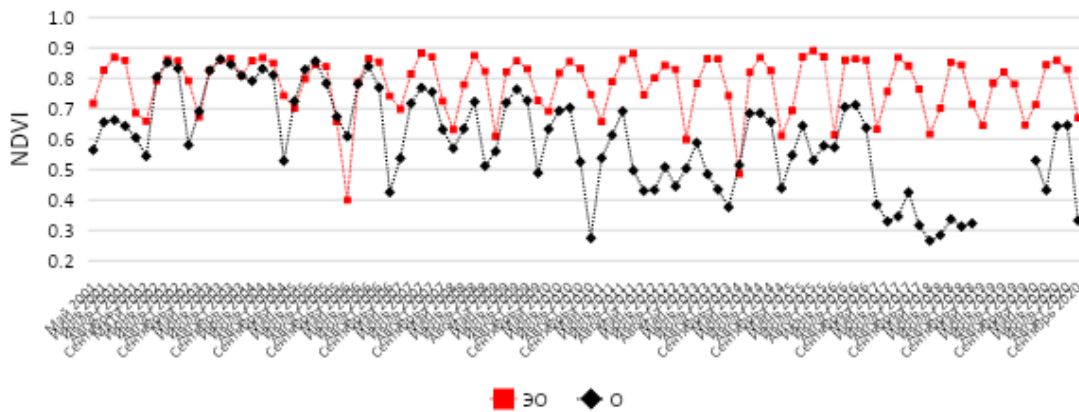


$\Delta$ NDVI

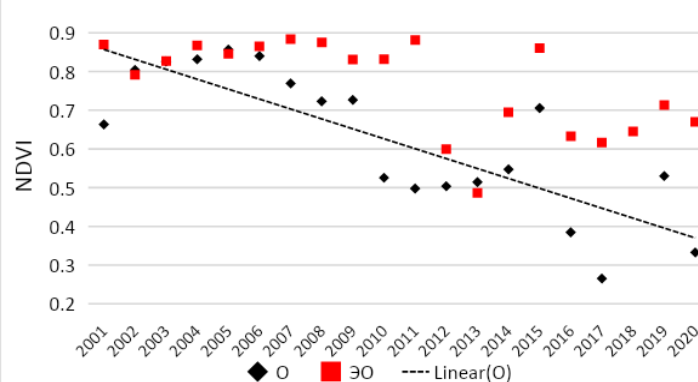
Разница Э0-О. Береза. Июль



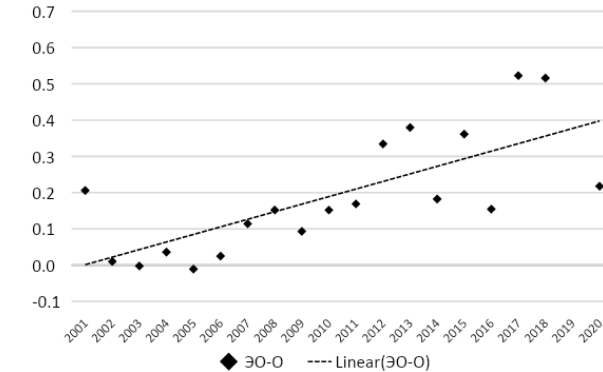
Сравнение участков сосны



Сравнение объектов. Сосна. Июль.

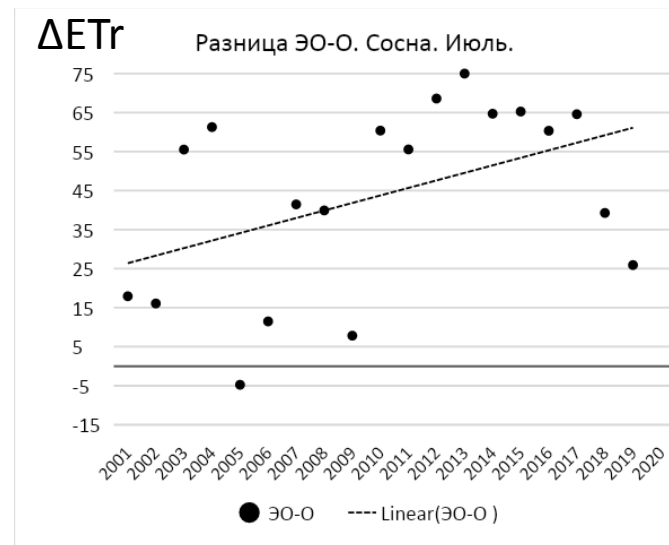
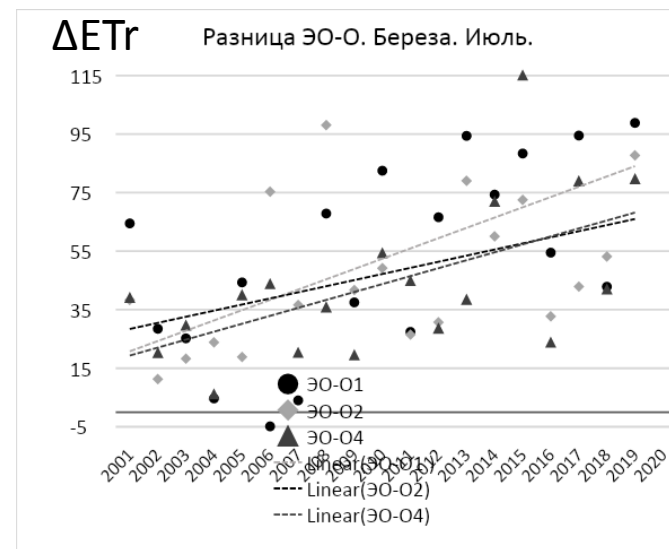
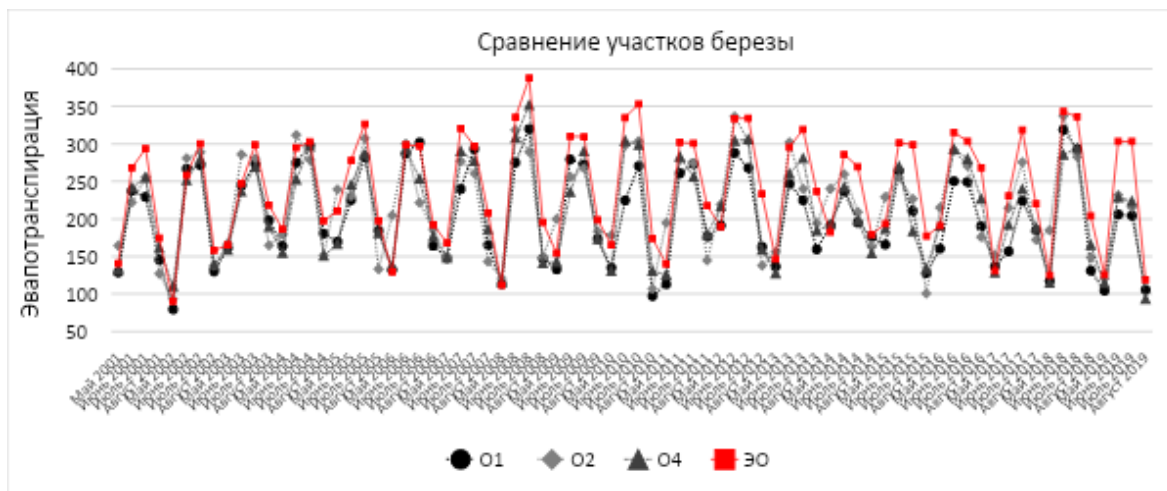


$\Delta$ NDVI Разница Э0-О. Сосна. Июль





# Качканар. Сравнение участков растительности по 7-дневному среднему суммарному испарению (MODIS) (кг/м2)



# "Норильский никель"

Основу минерально-сырьевой базы "Норникеля" составляют крупнейшие медно-никелевые месторождения страны — Октябрьское и Талнахское, уникальные по запасам и качеству руды. В них сосредоточены более 40 процентов разведанных мировых запасов платиноидов, более 35 — никеля, около десяти — меди и 15 — кобальта.

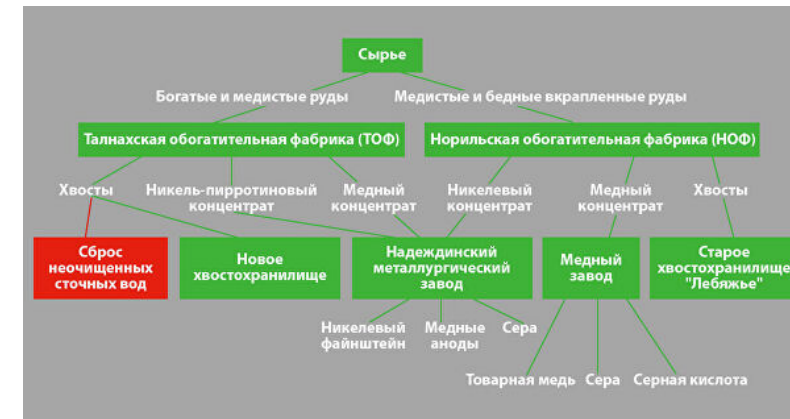


Карта расположения рудников Талнахского рудного узла и связанных с ними объектов ГК "Норильский никель"

Неперерабатываемые отходы — "хвосты" или шламы в виде жидкой взвеси — пульпы сливают в специальные открытые резервуары — хвостохранилища.

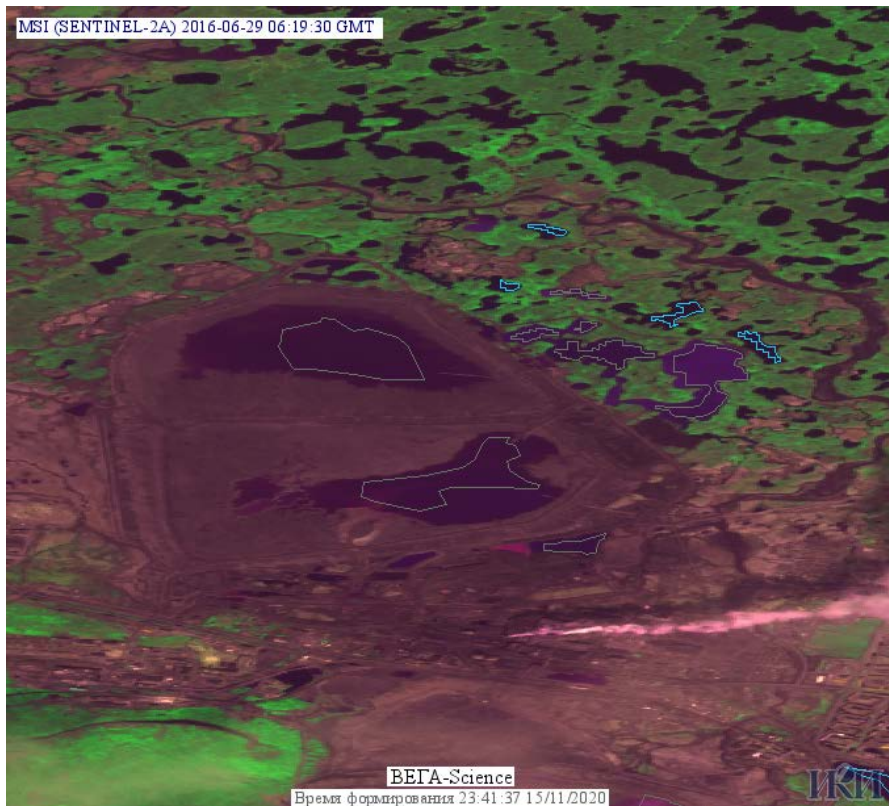
В 2015-2017-м Талнахскую обогатительную фабрику модернизировали. В результате ее мощность выросла более чем на 30 процентов — с 7,6 до 10,2 миллиона тонн руды в год. Потребовалось новое хранилище для отходов. Введено в эксплуатацию с 2017 года.

Существует вероятность, что при проектировании или строительстве нового хвостохранилища допустили нарушения или ошибки.



Производственно-технологический процесс компании "Норильский никель"

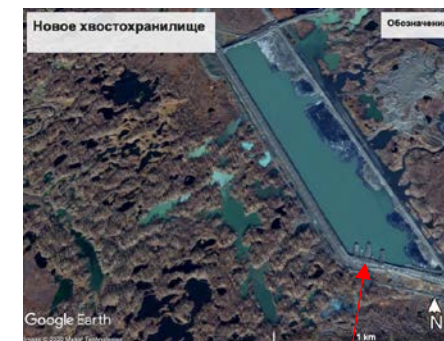
# Хвостохранилища "Лебяжье" и Новое



*Хвостохранилище "Лебяжье"*



*Новое хвостохранилище*

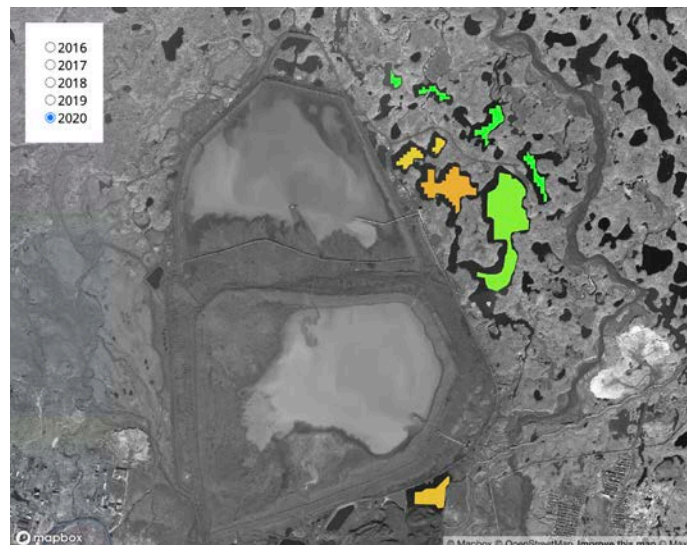
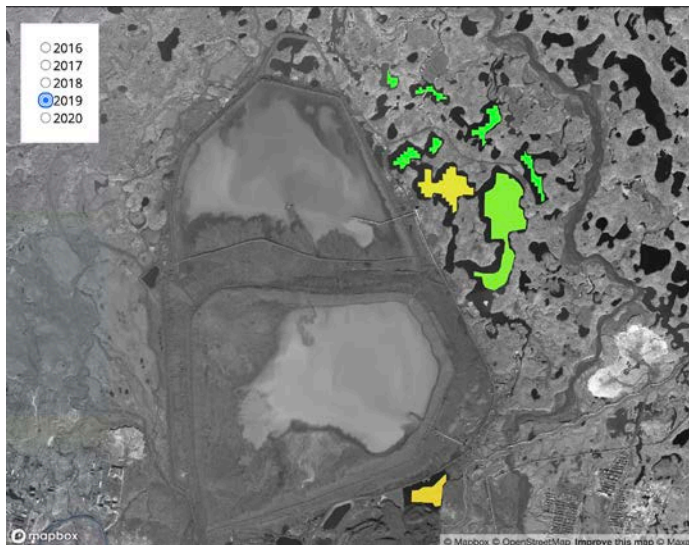
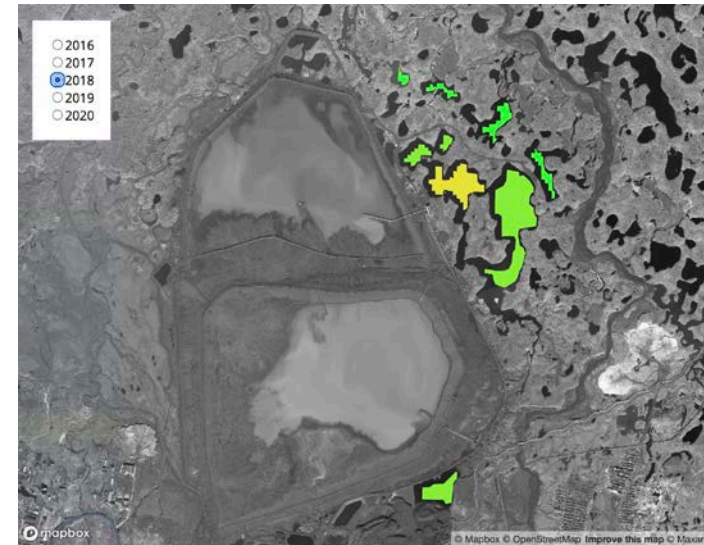
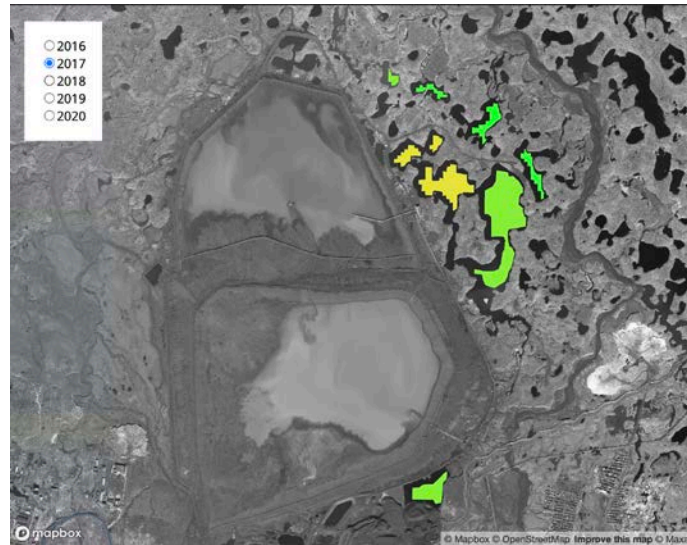
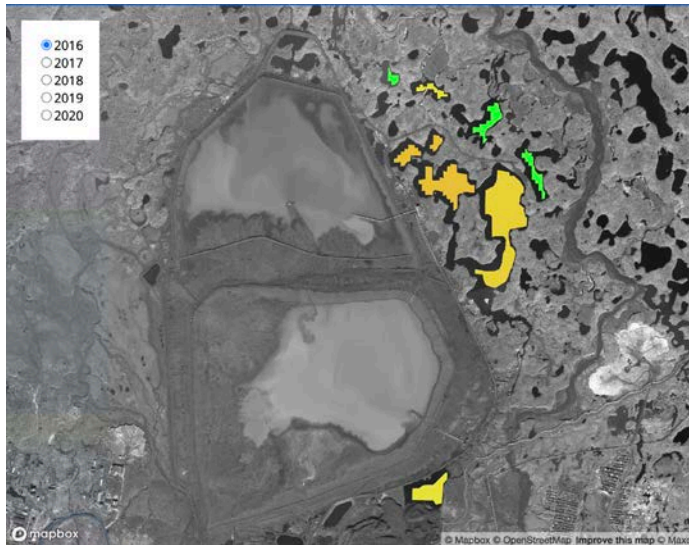


*На снимках видны озёра неестественного цвета вокруг хвостохранилищ*



*Сброс вод на "прилегающую территорию" в июне 2020, которые дальше могли попасть в реку Хараелах, впадающую в озеро Пясино*

# Хвостохранилище "Лебяжье". Карта загрязнения водных объектов

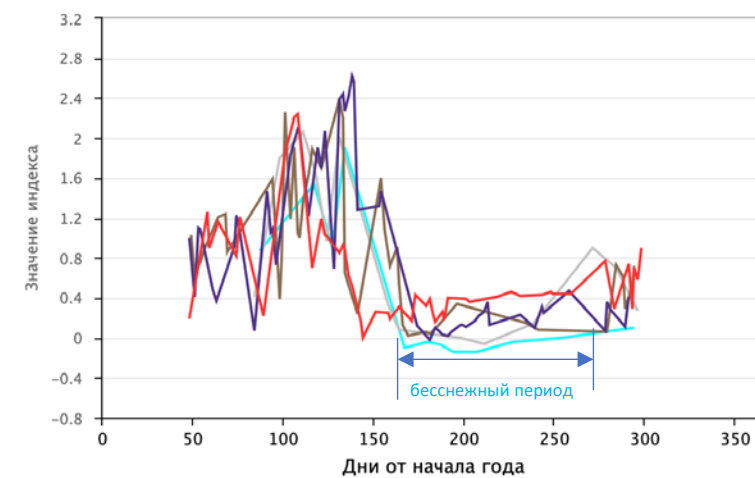
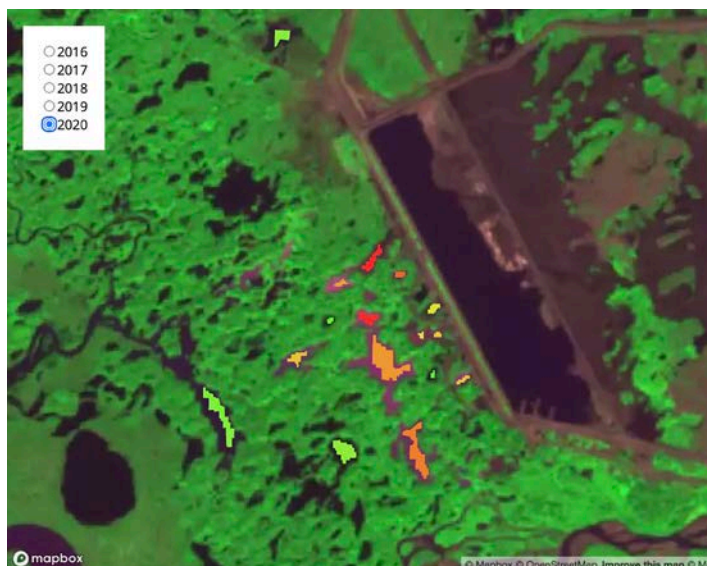
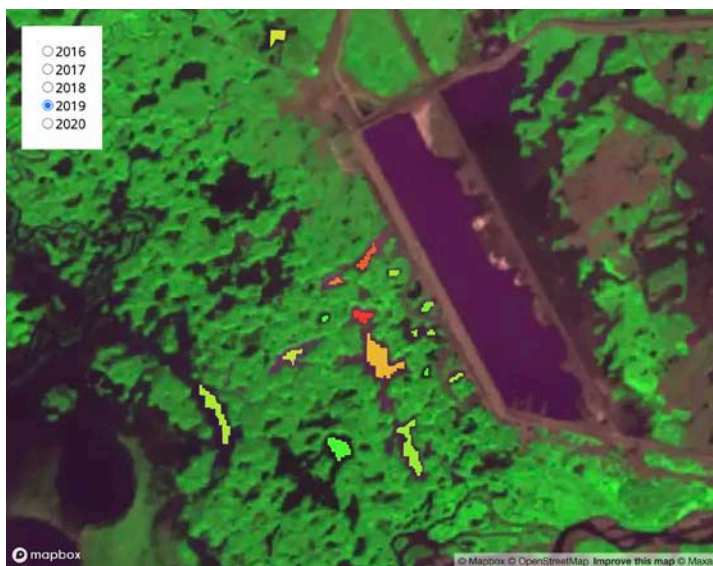
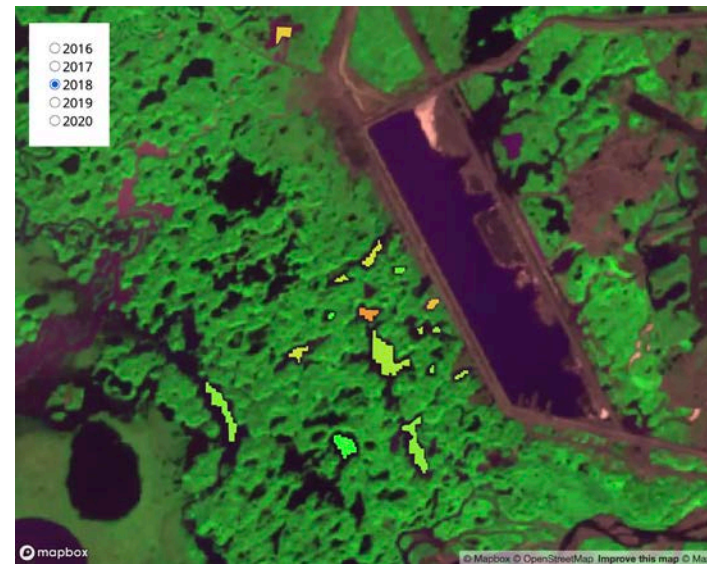
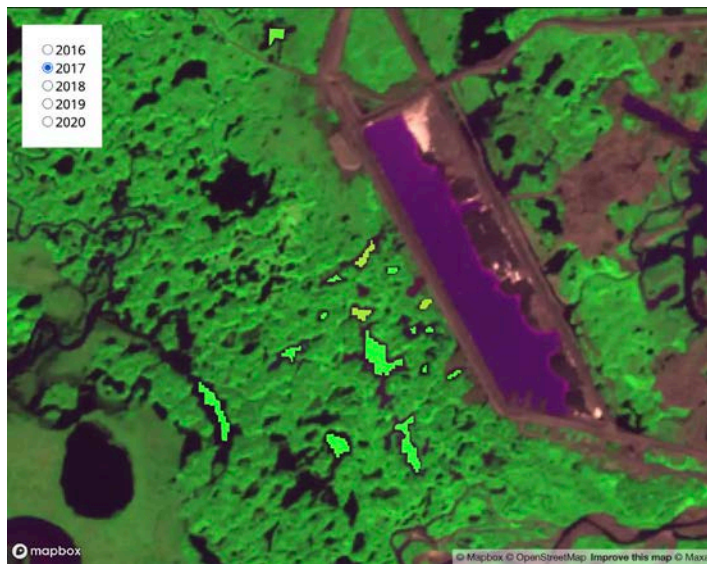
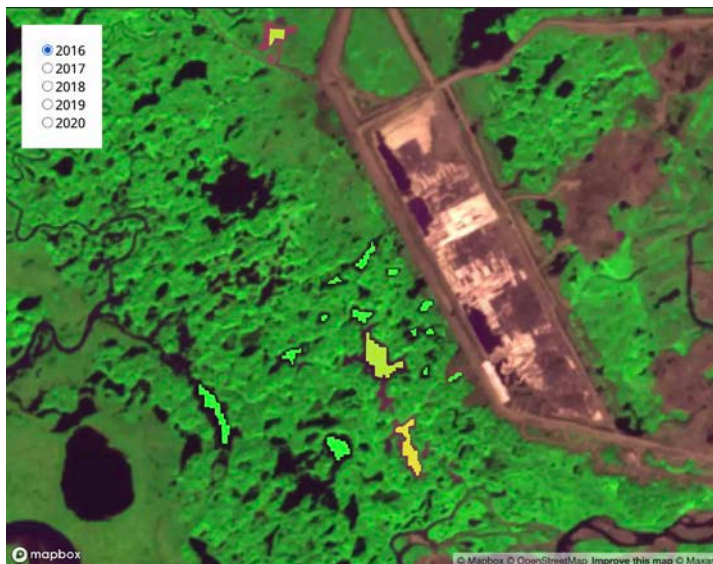


На изображениях представлено цветовым кодом количество недель, когда объекты были загрязнены, нормированное на общее количество недель наблюдений объектов за бесснежный период в каждом году с 2016 по 2020

Загрязнение объекта определялось с помощью автоматизированного индекса выделения воды ( **Automated Water Extraction Index AWEI1** ) :  
$$4 \times (\text{GREEN} - \text{SWIR1}) - (0,25 \times \text{NIR} + 2,75 \times \text{SWIR2})$$
, рассчитанным по данным Sentinel 2 (MSI)

Экспериментальным путём было установлено, что пики в значениях индекса соответствуют 20 загрязнению объекта (выбран порог **0.3**)

# Новое хвостохранилище. Карта загрязнения водных объектов



# Результаты

- ✓ В сервис Vega-Science был внедрён модернизированный инструмент наблюдения за объектами влияния ИТОО
- ✓ Описанные методы и походы позволили выявить долговременные изменения в растительном покрове, вызванные влиянием ИТОО
- ✓ Были проведены эксперименты по определению загрязнения водных объектов вокруг хвостохранилищ
- ✓ Гибкий и автоматизированный инструмент работы с наблюдениями объектов позволяет проводить исследования с использованием многолетних рядов спутниковых данных и выявлять показатели, наиболее подверженные влиянию техногенных отходов и отвалов для дальнейшей оценки загрязнённых территорий.



# Спасибо за внимание!

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-29-24121

