Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН - обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

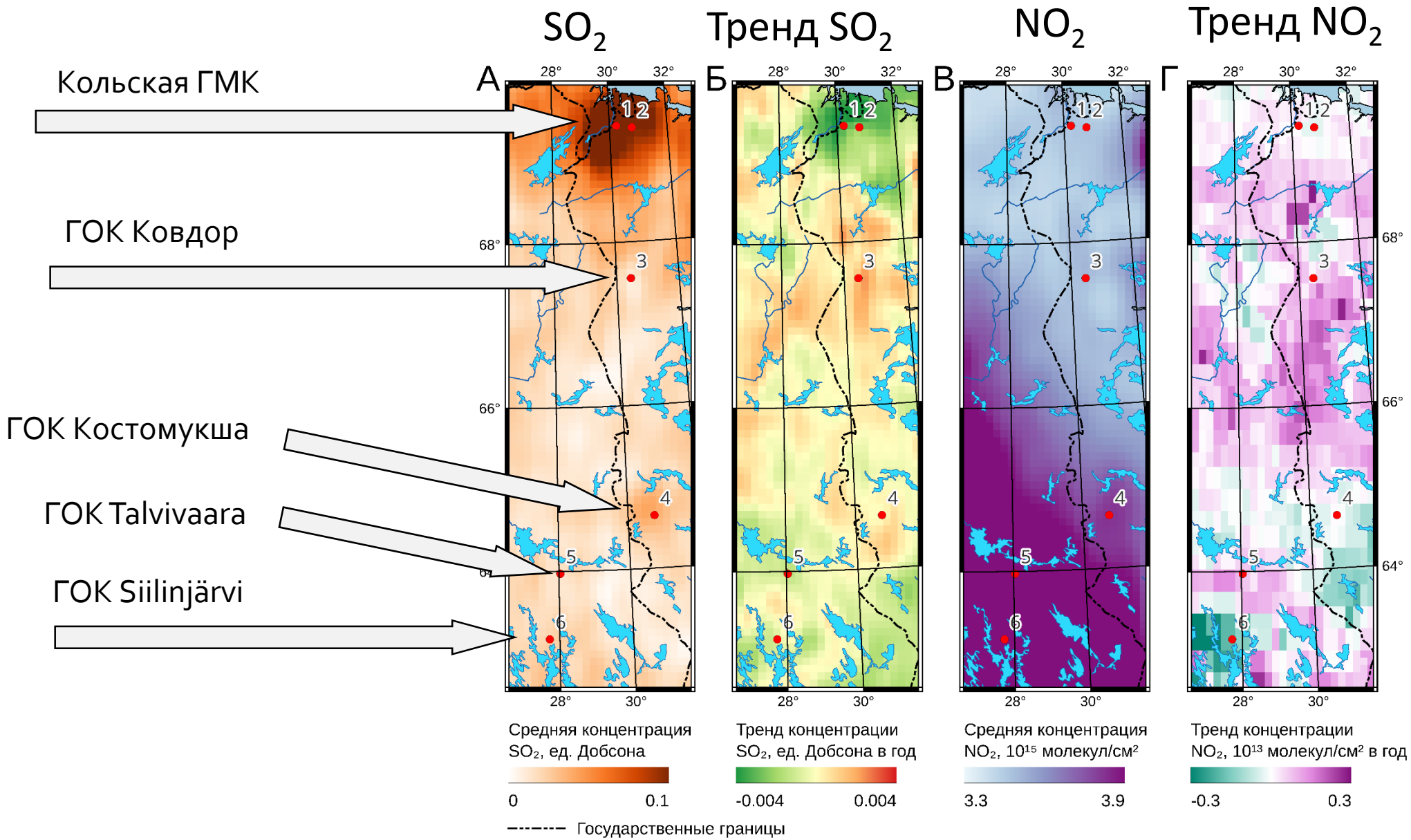
Спутниковое картирование влияния минерально-сырьевого комплекса Северо-Запада на здоровье лесных экосистем

В.И. Горный, *П.А. Безрученко, А.Б Манвелова, А.В. Киселев, А.А. Тронин*

Руководитель лаборатории
«Дистанционных методов геоэкологического мониторинга и геоинформатики»

Москва, ИКИ РАН
9-13 ноября 2026 г.

2 Региональное аэротехногенное воздействие ГМК



Цель и задачи исследования

Изучение многолетних изменений здоровья лесных экосистем вокруг ГМК

Задачи:

– разработка методики спутникового мониторинга здоровья лесных экосистем Северо-Западного Федерального округа РФ (СЗФО).

Оценить:

- угрозы потенциального трансграничного аэротехногенного воздействия на экосистемы СЗФО;
- эффективность природоохранных мер, принятых за последние два десятилетия.

4

Здоровье экосистем

Приращение удельной энтропии экосистемы

$$\Delta S(\tau_o+\Delta\tau)=[(\Delta W_{ph}+\Delta W_{ch})+\Delta\tau(\Delta P)]/T;$$

Здоровье экосистем – состояние устойчивого энергетического и биологического баланса экосистемы с окружающей средой

$S = Q / T$ - удельная энтропия, *Дж* K^{-1} $м^{-2}$;

Q - Количество тепла, получаемое или отдаваемое единичной площадью экосистемы из окружающей среды, *Дж/м²;*

T - Средняя абсолютная температура ЭС, K за время воздействия $\Delta\tau$, *сут;*

$\tau_\circ$ и τ - Время начала воздействия и текущее время, *сут;*

W - Полная (физическая и химическая) удельная нагрузка на ЭС, *Дж/м²;*

$P_\circ$ и P - Продуктивность ЭС, *Дж/(м² сут)*, соответственно: начальная и средняя за время воздействия

Jorgensen J S., Svirezhev Yu. M. Towards a , соотв Theory for Ecological Systems // Oxford: Elsever. 2004. 366 p.
Горный В. И. и др. Термодинамический подход к спутниковому картированию накопленного экологического ущерба лесных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 124–136

5

Термодинамическая мера здоровья ЭС

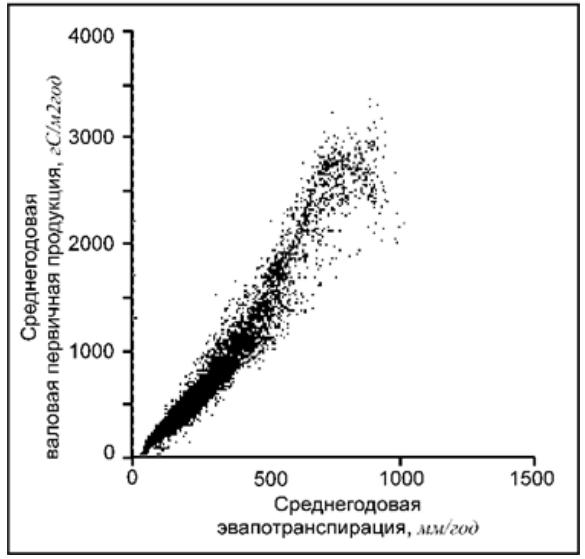
$$P = E \cdot m_C$$

P - Удельная продуктивность ЭС, *кг/сут*

m_C - Транспирационный коэффициент – «константа» для данной ЭС, *кг/сут*.

E – Удельная скорость испарения влаги с поверхности ЛЭС, *кг/(м²·сут)* - мера здоровья ЭС.

Сопоставление среднегодовой скорости испарения с валовой первичной продукцией [Zhao, et al, 2005]



Термодинамический показатель здоровья ЭС (ТПЗЭ):

$$ТПЗЭ = E(x,y)/E_o(x,y);$$

$E_o(x,y)$, $E(x,y)$ - удельные скорости испарения с поверхности, соответственно здоровой и импактной ЭС, *мм/(м²сут)*;

Горный В. И. и др. Термодинамический спутниковый мониторинг здоровья лесных экосистем водосборного бассейна Финского залива (на примере Карельского перешейка)// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 31–44

6

Кольская ГМК, Мурманская область

г. Никель



г. Заполярный



ГМК	Продукция	Основные аэротоксиканты
Кольская ГМК, Мурманская область	Сульфидные медно-никелевые руды, Сульфидный никелевый концентрат	SO_2, NO_2, PM

7

Ковдорский ГОК, Мурманская область





ГМК	Продукция	Основные аэротоксиканты
Ковдорский ГОК, Мурманская область	Апатитовый концентрат, Железорудный концентрат, Бадделеитовый концентрат	NO_x, SO_2, CO, PM (SiO_2 и белый корунд)

8 Костомукшский ГОК «Карельский окатыш, Республика Карелия





ГМК	Продукция	Основные аэротоксиканты
АО «Карельский окатыш», Республика Карелия	Железная руда офлюсованные и неофлюсованные железорудные окатыши[4].	Fe_2O_3, NO_x, SO_2, CO, PM (20-70% SiO_2)

ГОК «Talvivaara»



ГМК	Продукция	Основные аэротоксиканты
Рудник «Talvivaara», Terraffame Oy, Финляндия	Ni-Zn-Cu-Co руды, Урановая руда (уранинит UO_2).	H_2S, H_2SO_4, SO_2

ГОК «Siilinjärvi», Yara Suomi Oy



ГМК	Продукция	Основные аэротоксиканты
Рудник «Siilinjärvi», Yara Suomi Oy, Финляндия	Апатитовый концентрат, Кальцитовый концентрат Слюда. [23]	NO_x, SO_2, CO, PM (SiO_2)

Материалы

Диоксиды серы и азота в атмосфере:
Ozone Monitoring Instrument (OMI), спутник Aura (с 2004 г., разрешение 0.25°):

- . продукт OMSO2e, ежедневное содержание SO_2 в приземном слое воздуха;
- продукт OMNO2d — содержание NO_2 в тропосфере.

Скорость испарения влаги, осреднённая за восьмидневный период (для **ТПЗЭ):**

- стандартный продукт MOD16A2GF спектрорадиометра MODIS спутника Terra (MODIS) с

.
Цифровые карты типов ЭС на основе обработки стандартного продукта

- MCD12Q1;
- Растительности России TerraNorte RLS.

Цифровая карта покрытия лесов (2000 - 2025 гг)

Методика: картирование здоровых экосистем

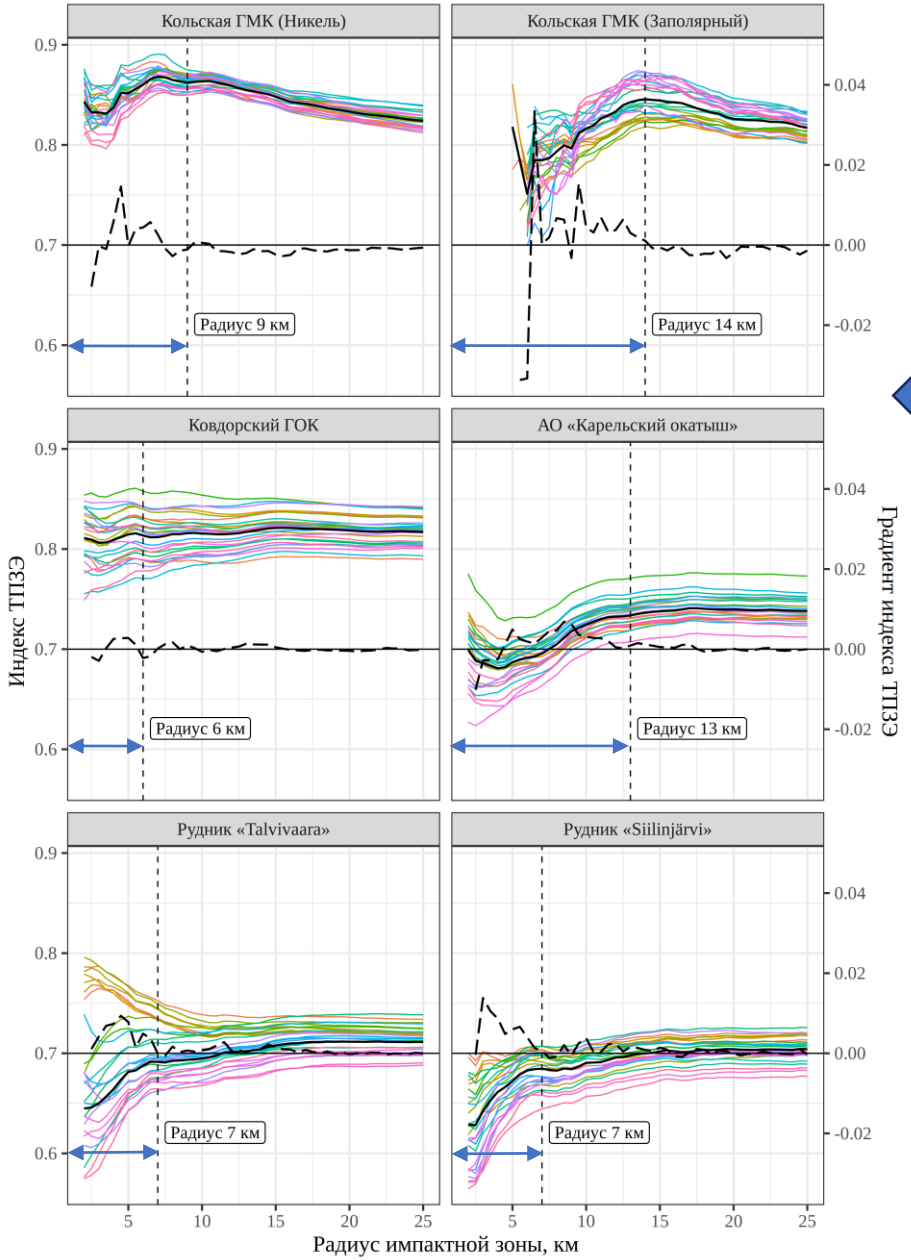
В качестве здоровой принималась ЭС, у которой скорость испарения:

$$E_o \geq \overline{E} + 3\sigma.$$

$\overline{E}$ - средняя скорость испарения данной ЭС на всей исследуемой территории.

σ - СКВО.

Методика: определение границ импактной зоны

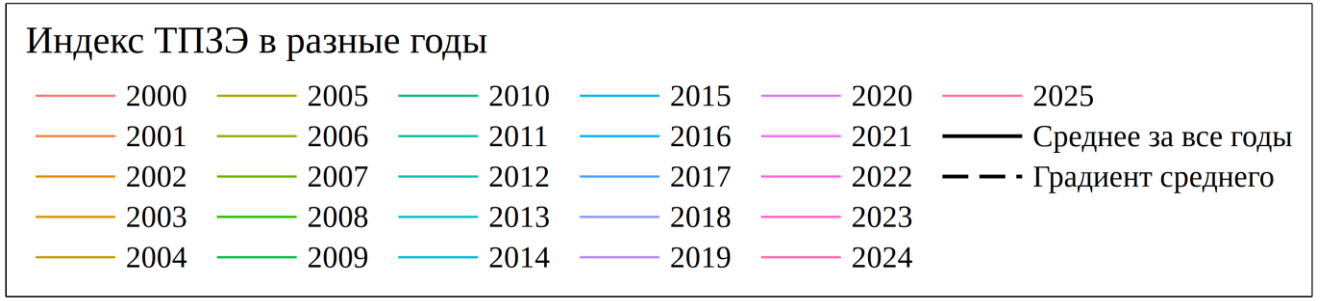


Импактная зона - территория, прилегающая к ГМК, где наблюдается максимальная техногенная нагрузка, приводящая к снижению здоровья ЭС

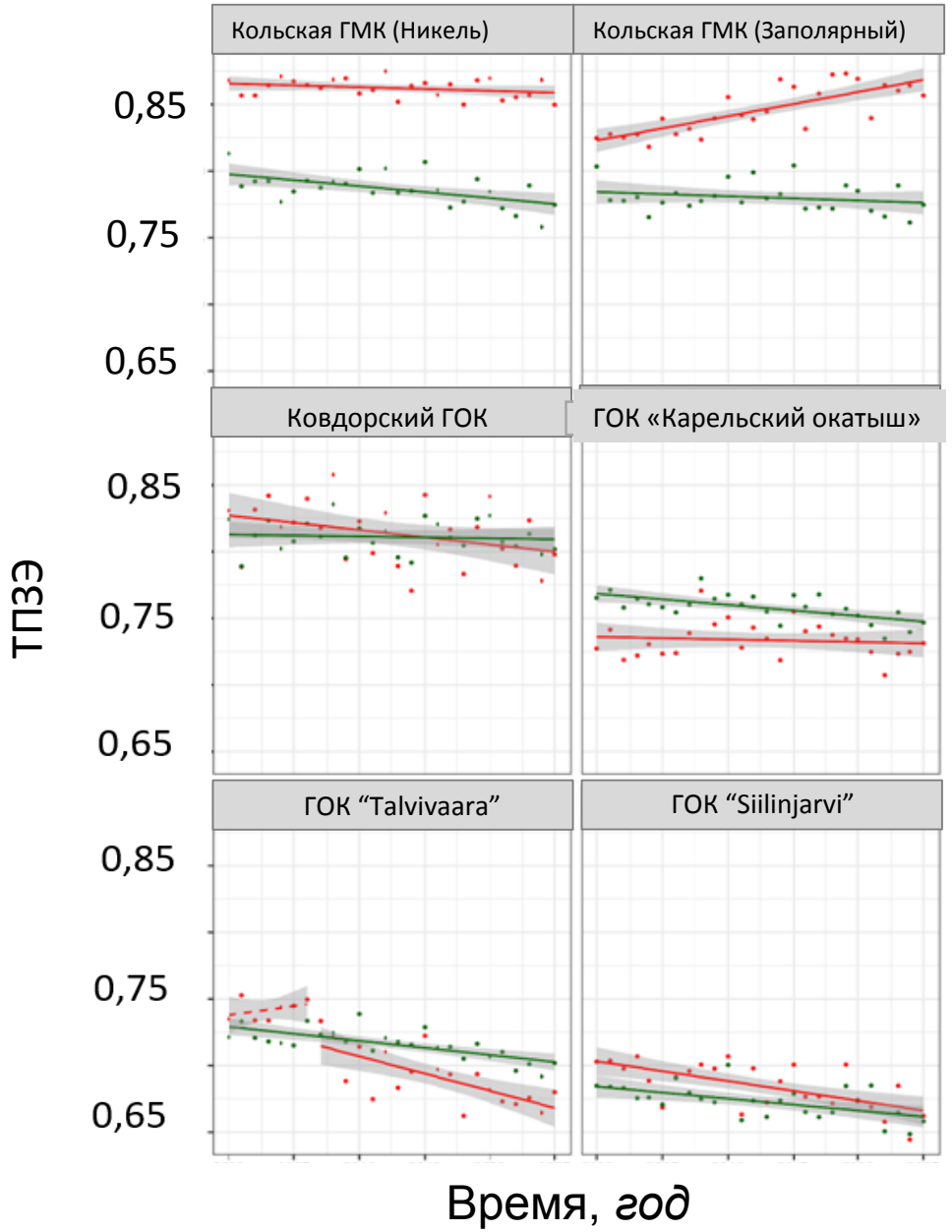
Зависимость ТПЗЭ от расстояния до ГМК в разные годы

- Среднее ТПЗЭ за весь период мониторинга;

- Горизонтальный градиент среднего ТПЗЭ.



Изменения ТПЗЭ в период 2002-2025 гг



- Ипактная зона;
- Фоновая зона.

Заключение

- Чувствительность ТИЗЭ позволяет на двадцатилетнем интервале времени зарегистрировать изменения здоровья экосистем, подверженных воздействию со стороны ГМК.

- Целесообразно продолжить мониторинг здоровья ЛЭС единственного в Европейском Союзе рудника, добывающего уран - ГОК «Talvivaara» (Финляндия», в том числе, для наблюдения за угрозой аэротехногенного переноса продуктов выщелачивания урана.

- На основе термодинамической теории экосистем разработана технология спутникового мониторинга здоровья ЛЭС, подверженных воздействию крупных ГМК.

- Технология может быть применена для всех ЛЭС России с использованием информационной системы ИКИ РАН «ВЕГА-Science», где подготовлены и регулярно дополняются все необходимые для картирования ТИЗЭ спутниковые материалы.