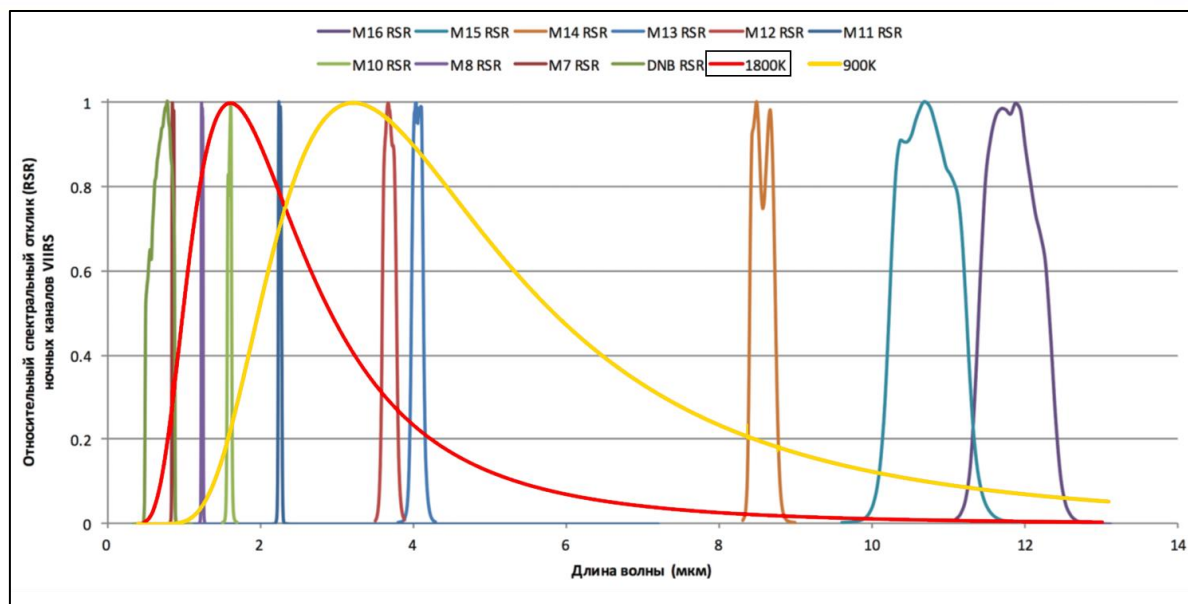


Перспективы мониторинга чрезвычайных ситуаций на нефтегазовых объектах с применением мультиспектрального инфракрасного ДЗЗ

Отдел телекоммуникационных сетей и
высокопроизводительных
вычислительных комплексов
ИКИ РАН

Автор:
Матвеев Алексей

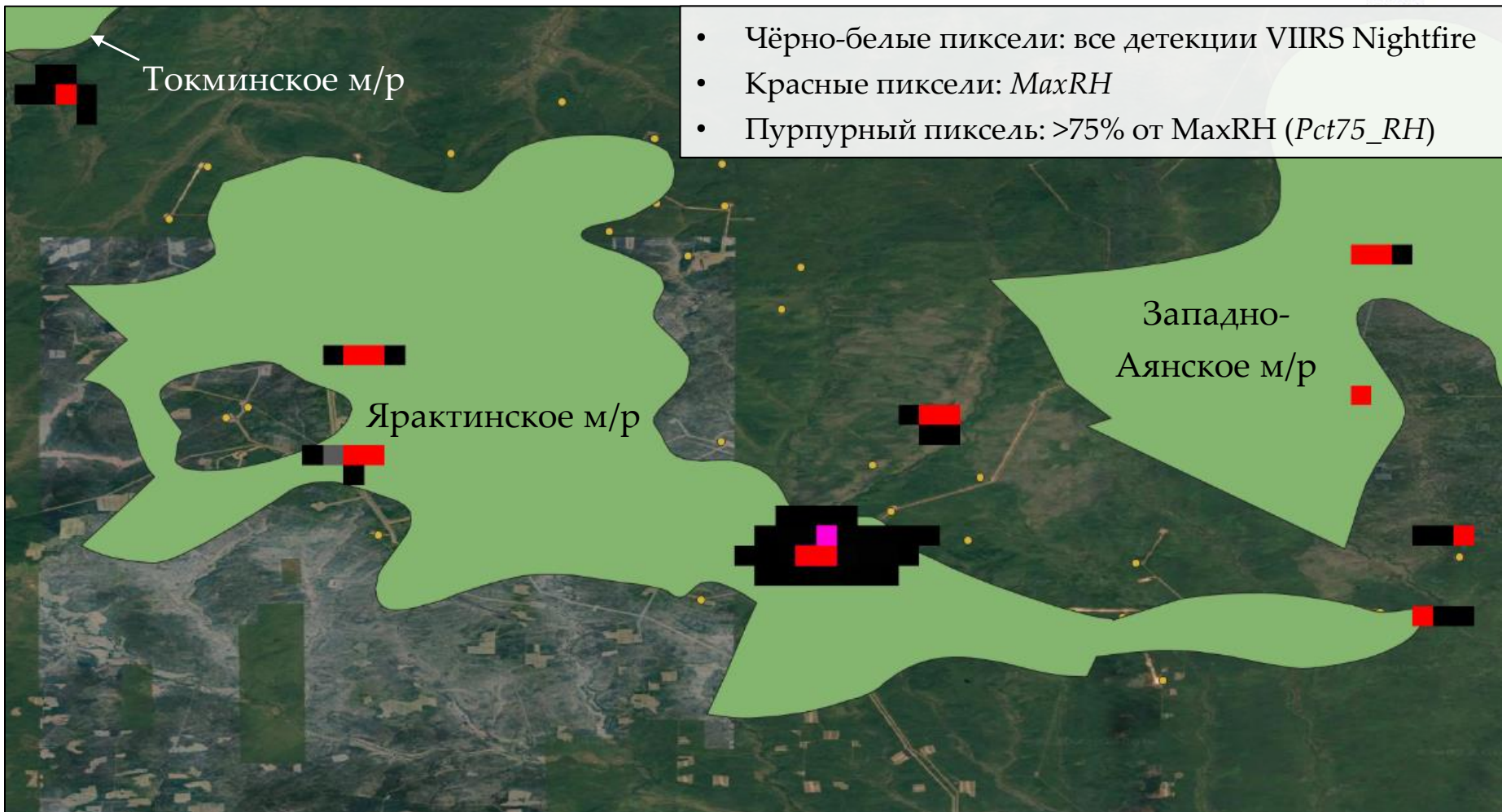
Принцип методики VIIRS Nightfire (VNF)



- Днём SWIR зашумлён отражением солнечного излучения; поэтому методика VIIRS Nightfire использует снимки с солнечным зенитным углом $>95^\circ$. Применяется маска облаков.
- Для каждой термоаномалии кривая Планка моделируется по действующим ночью ИК-каналам “М” сенсора VIIRS.
- **Красная** кривая Планка, соответствующая типичной для газовых факелов температуре 1 800 К (сред. оценка в 2021 г.: 1 788 К), достигает пика в диапазоне ближнего ИК (1.6 и 2.25 мкм). **Жёлтая** типична для лесных пожаров с $T \approx 900$ К, имеющих макс. отклик в среднем ИК (3.6–4.1 мкм).
- Энергия излучения RH оценивается при помощи температуры и оценённой площади субпиксельного источника: $RH = \sigma T^4 S$. Она эквивалентна метрике Fire Radiative Power (FRP) оценки (лесных) пожаров на основе экспериментальных данных: обе рассчитываются в Вт.

VIIRS Nightfire: MaxRH vs Pct75_RH vs все детекции

(29.07.2022, Ярактинское и Западно-Аянское месторождения, Иркутская обл.)



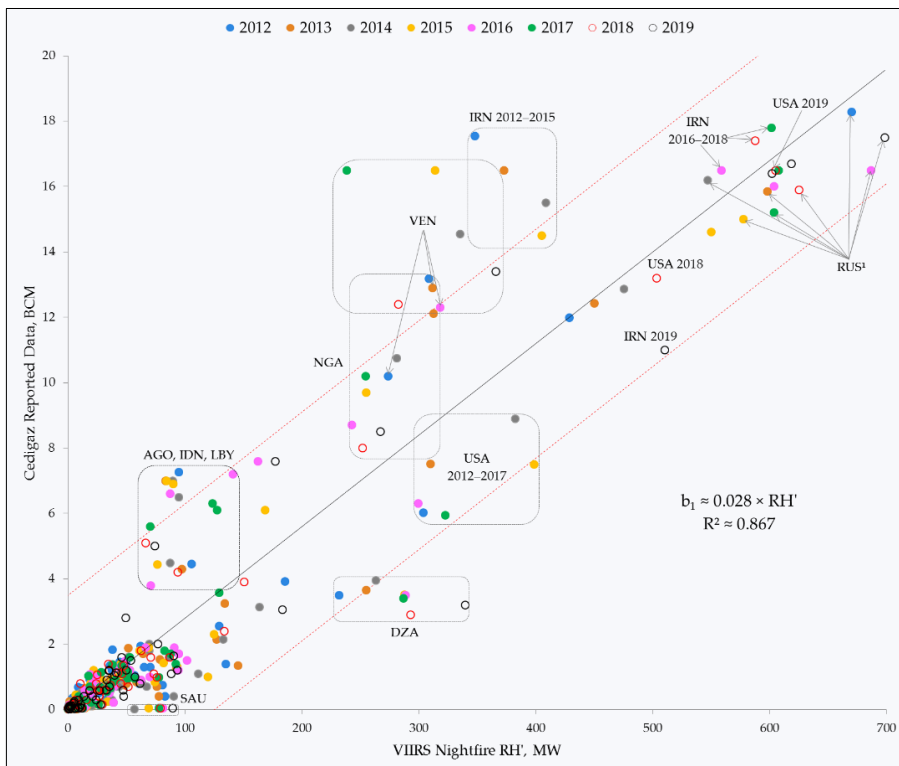
- Чёрно-белые пиксели: все детекции VIIRS Nightfire
- Красные пиксели: *MaxRH*
- Пурпурный пиксель: >75% от *MaxRH* (*Pct75_RH*)

- Условие детекции термоаномалии:

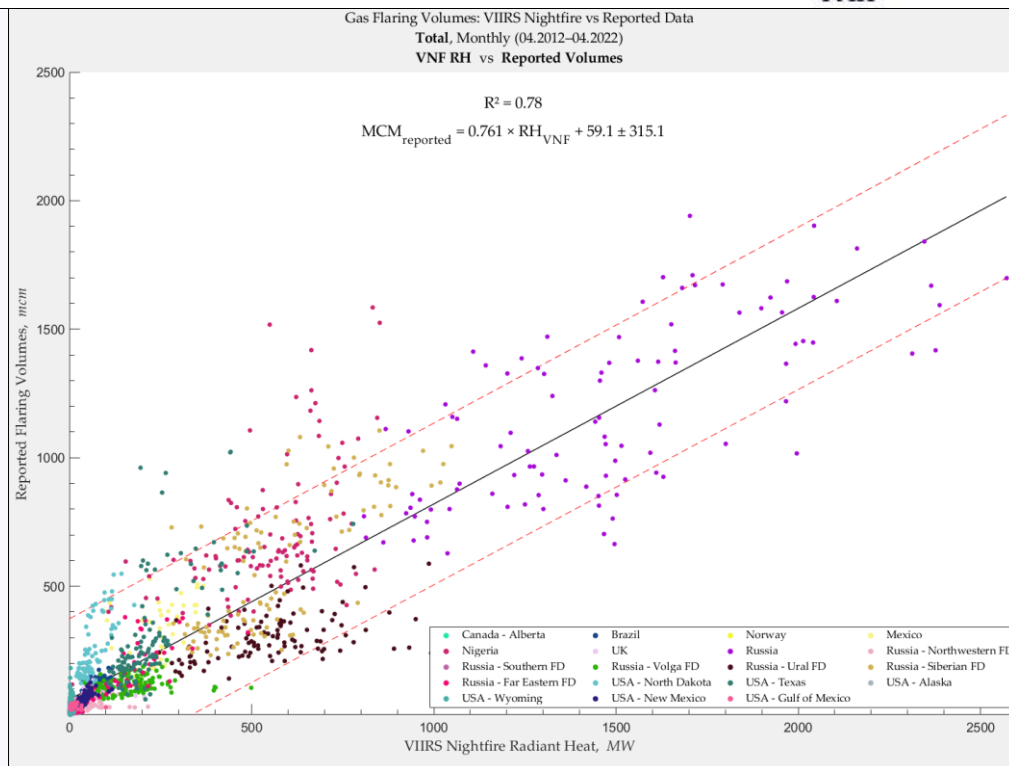
$$R_{pix} \geq \text{mean}(R_{image}) + 4 \times \text{stdev}(R_{image}),$$

- *SumRH* = все детекции, *MaxRH* = только локальный макс., *Pct75RH* = детекции с RH >75% от *MaxRH*.

Корреляция данных Nightfire ($MaxRH$): по странам (ежегодные) и отд. регионам (ежемесячные)



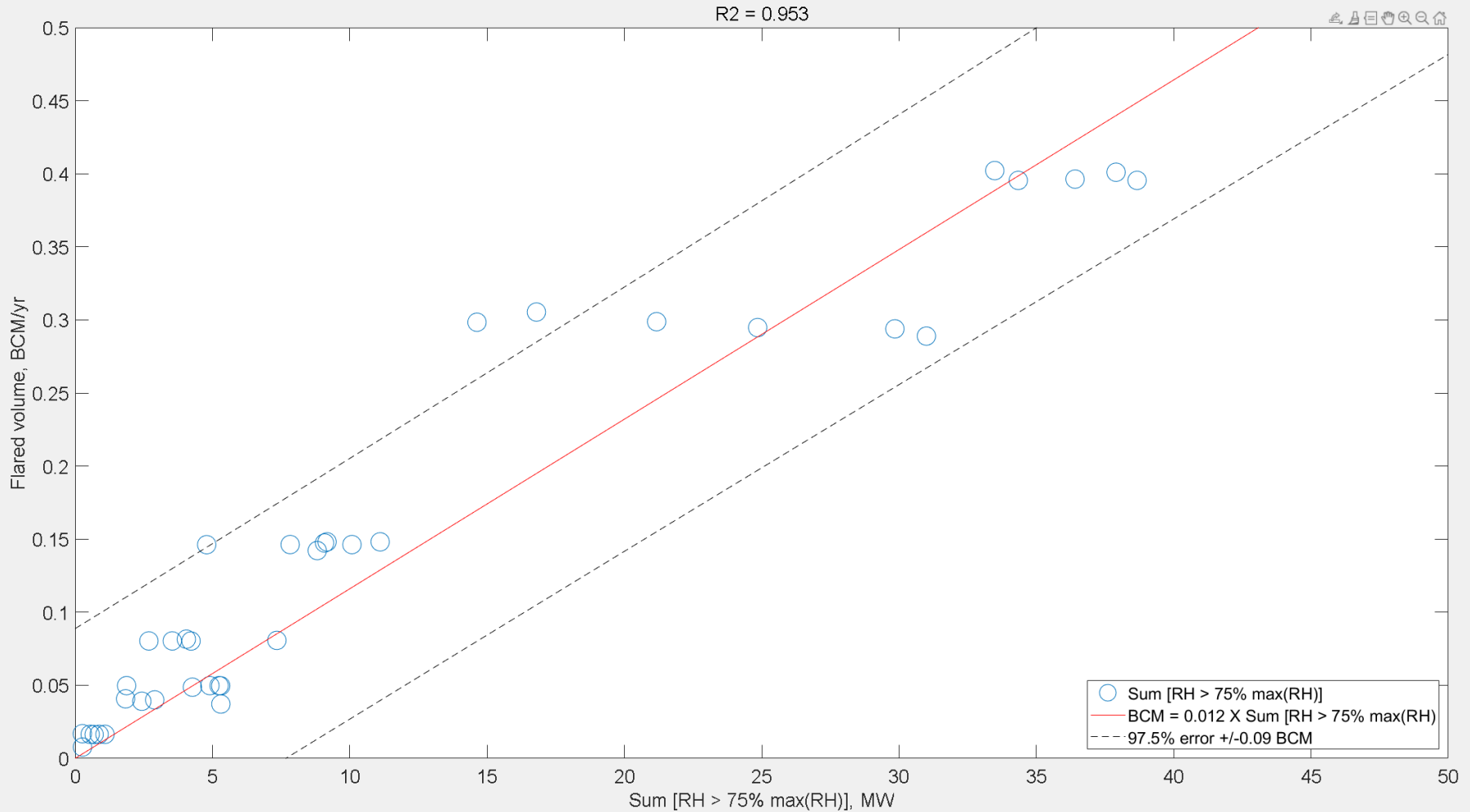
Корреляция с данными ассоциации **Cedigaz**
(по странам, млрд. м³ в год)



Корреляция с **национальной отчётностью**
(по отд. регионам и странам, млн. м³ в месяц)

- Сильная корреляция с оценками ассоциации Cedigaz: $R^2 = 0.867$; $V \approx 0.028 \times MaxRH'$ [млрд. м³ / год].
- Корреляция с ежемесячной отчётностью регионов: $R^2 \approx 0.78$; $V \approx 0.761 \times MaxRH + 59$ [млн. м³ / мес.] (ФО РФ, штаты США, Альберта (Канада), Бразилия, Великобритания, Мексика, Нигерия, Норвегия).
- Возможна недооценка Nightfire в случае крупных факелов (Ванкорское м/р, 2013 г.: 6 vs 1.6 млрд. м³ (отчёт vs Nightfire); комплекс м/р Ку-Maloob-Zaар, Мексика, 2021 г.: 3.1 vs 0.56 млрд. м³).

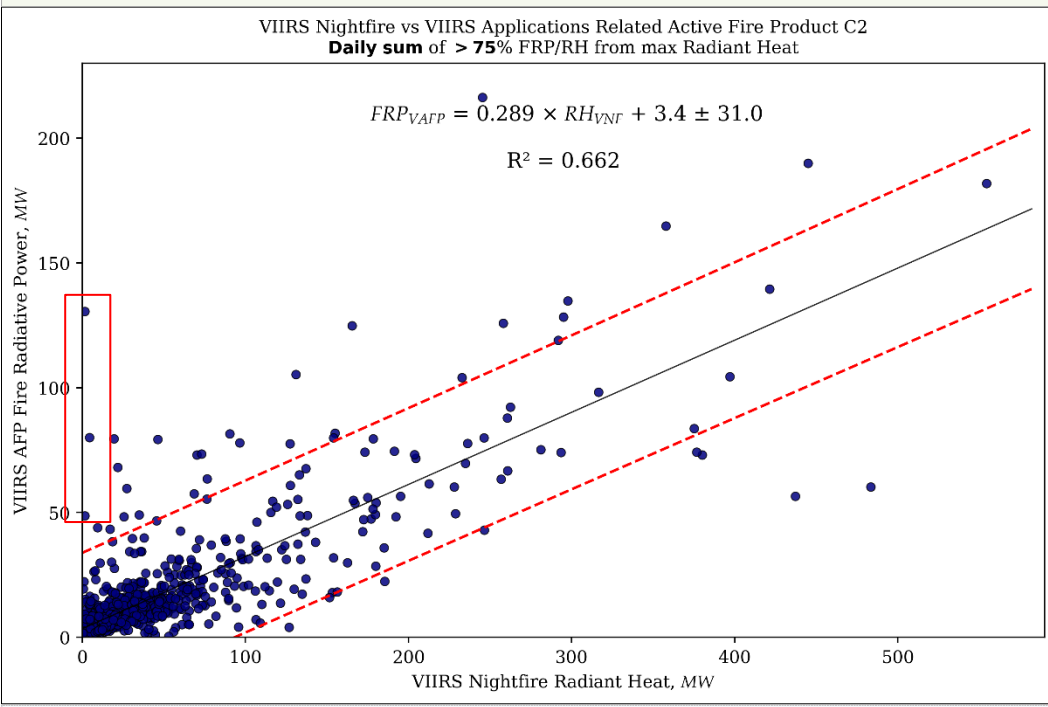
Экспериментальная верификация методики ($PctRH_{75}$)



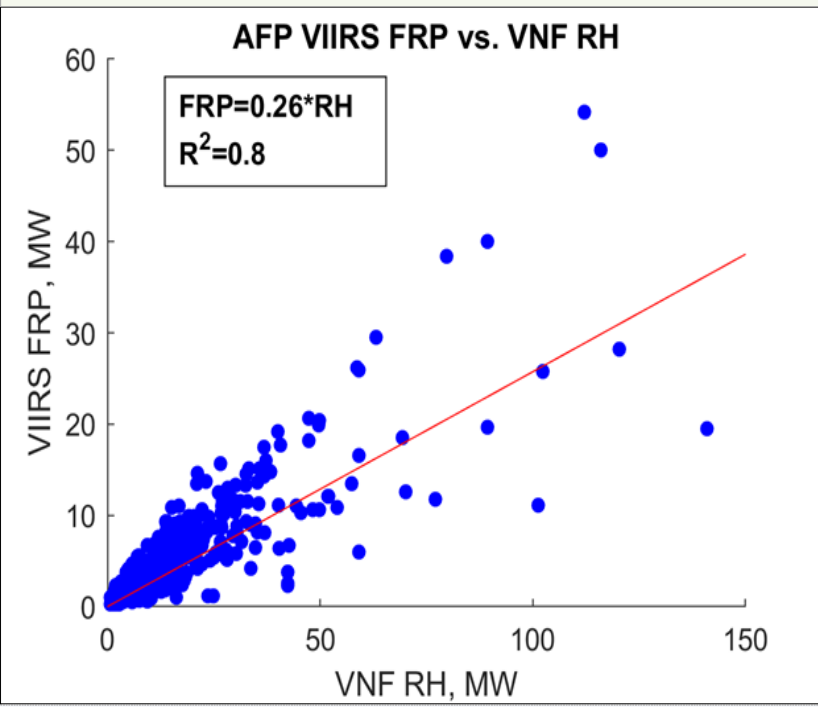
- Коэффициент перевода: $V \approx 0.0116 \times PctRH_{75}$ (МВт \rightarrow млрд. м³ / год), или:
1 млрд. м³ [сожжённого газа] = 86.2 МВт [энергии излучения].

FRP (Active Fire Product) → RH → объёмы сжигания

Корреляция Nightfire vs Active Fire Product:
Pct75_RH, по примерам в презентации

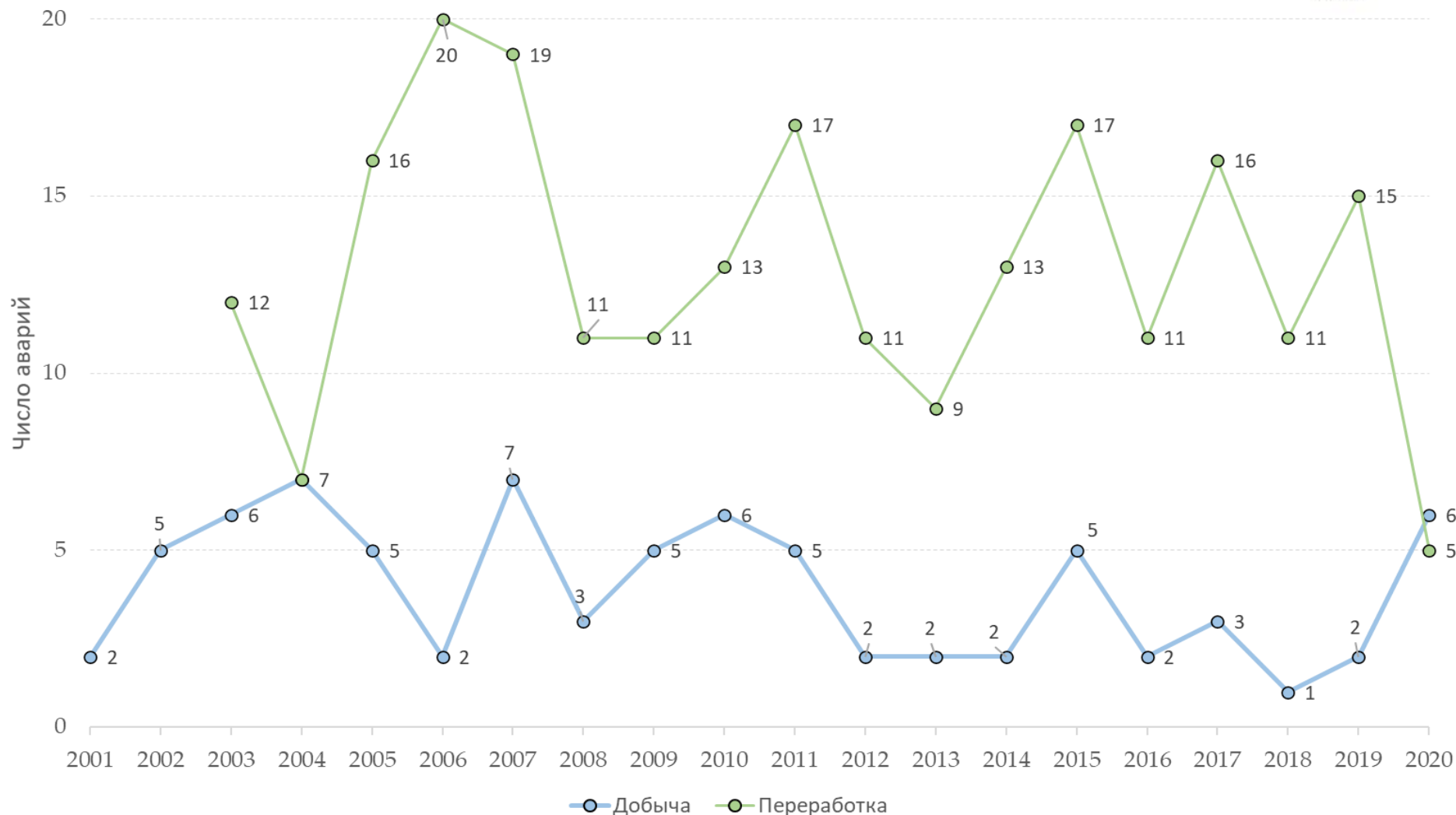


Корреляция Nightfire vs Active Fire Product:
MaxRH, серия снимков ХМАО — Югры



- Перевод MODIS и VIIRS Active Fire Product FRP в объёмы сжигания проводится через прокси — RH.
- Используемые коэффициенты перевода (по всем проанализированным случаям) **FRP → RH**:
 - VIIRS: 0.294 (**Pct75_FRP → Pct75_RH**); 0.327 (**MaxFRP → MaxRH**);
 - MODIS: 0.391 (**Pct75_FRP → Pct75_RH**); 0.523 (**MaxRH → MaxRH**).
- Независимо (справа) были получены другие коэффициенты для **MaxFRP → MaxRH**: 0.26 (VIIRS) и 0.29 (MODIS) соответственно; возможна переоценка.

Число пожаров и взрывов на нефтегазовых объектах РФ (по данным Ростехнадзора)



Источник: Годовые отчёты о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2004–2020 гг.

Авария (н/д в методике): Таллинское м/р, 09.12.2020

(Оренбургская обл., 65 км СВ от Бузулука, lat/lon: 53.1239° с. ш., 53.0989° в. д.)



Возгорание на Таллинском месторождении-2 ГУ МЧС России по Оренбургской области

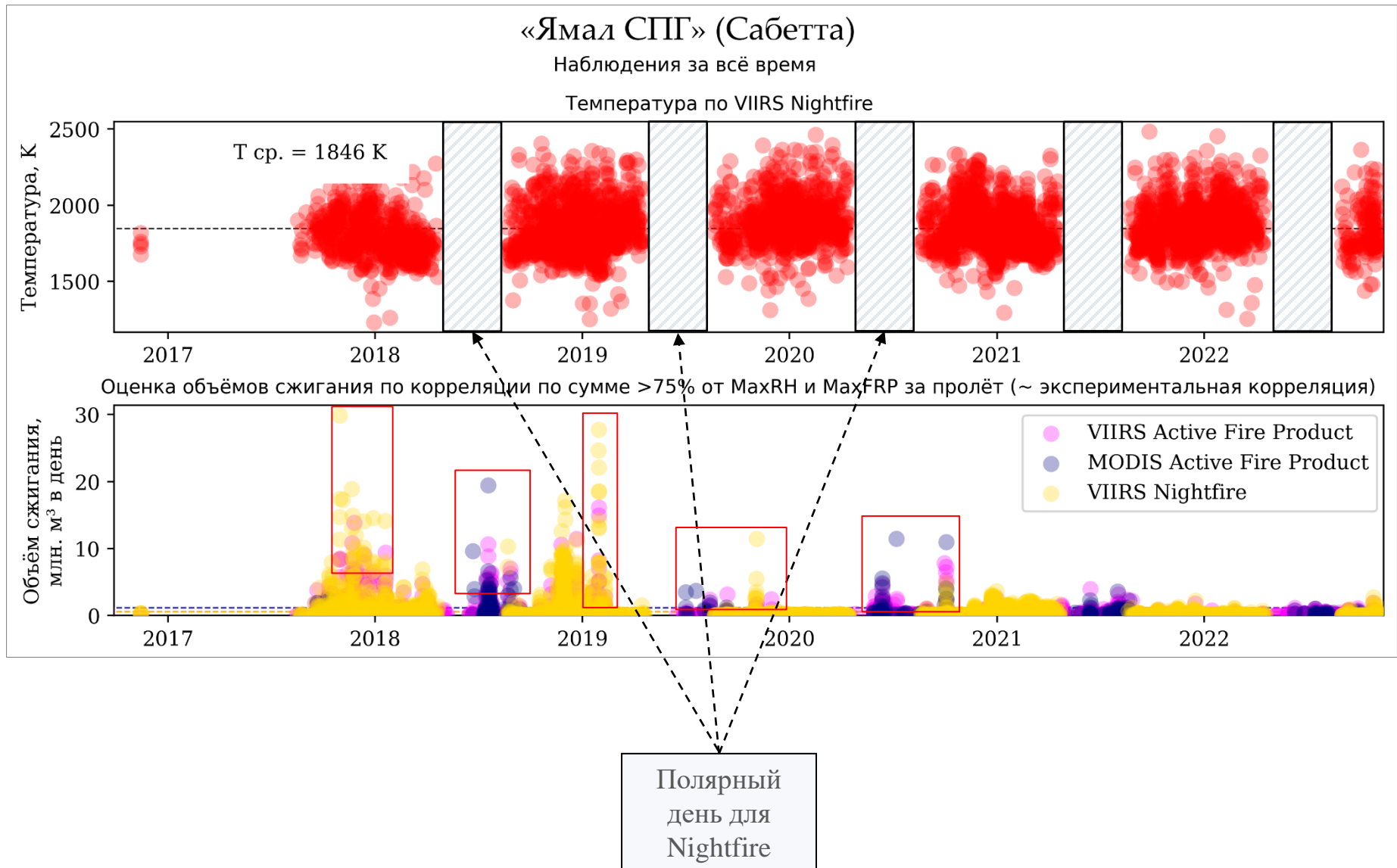
Снимок Sentinel-2 MSI (B12, 2.2 мкм), 09.12.2020, 07:45 UTC

Источник: YouTube

- «9 декабря 2020 г. при проведении спускоподъемных операций при бурении скважины на ОПО «Участок ведения буровых работ», эксплуатируемом ООО «Нефтегорская буровая компания», произошел выброс газовой смеси и её возгорание с последующим разрушением буровой вышки и части вспомогательного оборудования» — Ростехнадзор.
- Пожар ликвидирован день в день (07:00–21:00), но факел успел попасть на снимок Sentinel-2 MSI.

Пример (без аварии): «Ямал СПГ», всё время

(Сабетта, 71.2556° с. ш., 72.0709° в. д.)

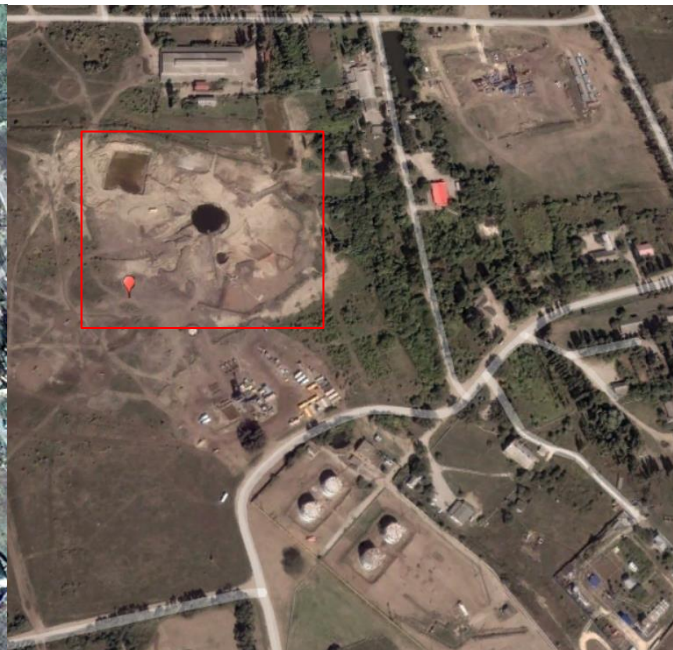


Авария: Анастасиевско-Троицкое м/р, 18.05–30.07 2013

(Краснодарский край, 85 км З от Краснодара, lat/lon: 45.1606° с. ш. 37.8816° в. д.)



До взрыва (2010 г.)...



...после взрыва (09.2013)



Выброс газа на скважине

- «Крупная авария произошла 15 мая 2013 г. в ООО «РН-Краснодарнефтегаз» на скважине №249 Анастасиевско-Троицкого месторождения Краснодарского края, где во время проведения прострелочно-взрывных работ, произошёл выброс газонефтяной смеси. Технические причины аварии — разгерметизация линии глушения между устьевой задвижкой и крестовиной фонтанной арматуры с дальнейшим разрушением их корпусов при закрытии концевой задвижки, установленной на блоке дросселирования» — Ростехнадзор.

Авария: Анастасиевско-Троицкое м/р, 18.05–30.07 2013

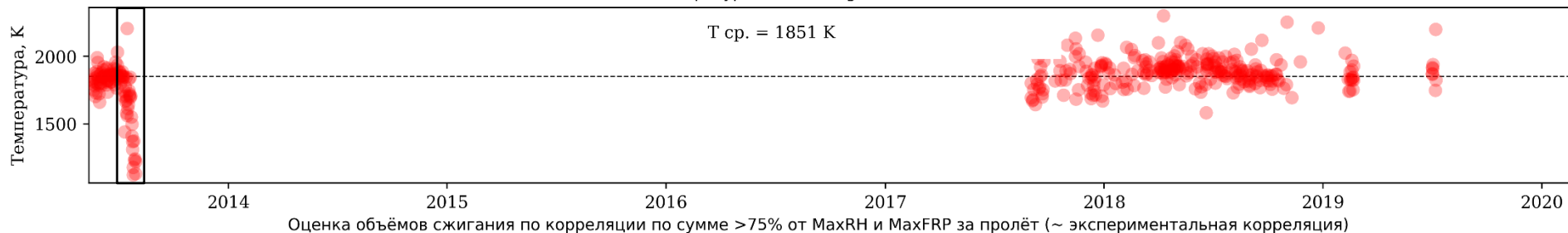
(Краснодарский край, 85 км З от Краснодара, lat/lon: 45.1606° с. ш. 37.8816° в. д.)

Анастасивско-Троицкое (скв. 249)

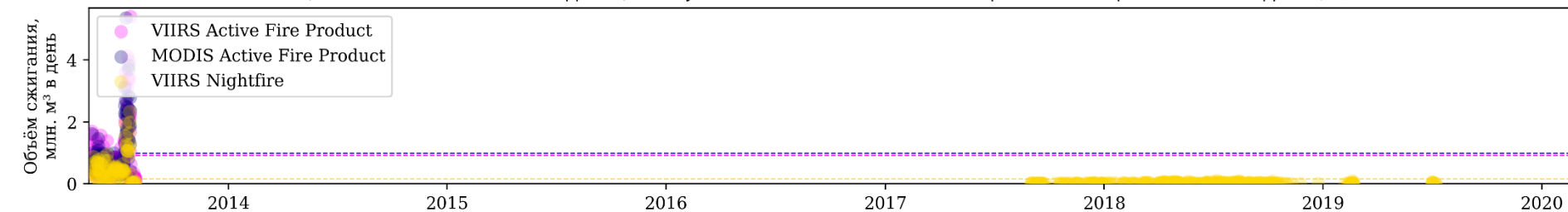
Наблюдения за всё время

Температура по VIIRS Nightfire

Т ср. = 1851 К



Оценка объёмов сжигания по корреляции по сумме >75% от MaxRH и MaxFRP за пролёт (~ экспериментальная корреляция)



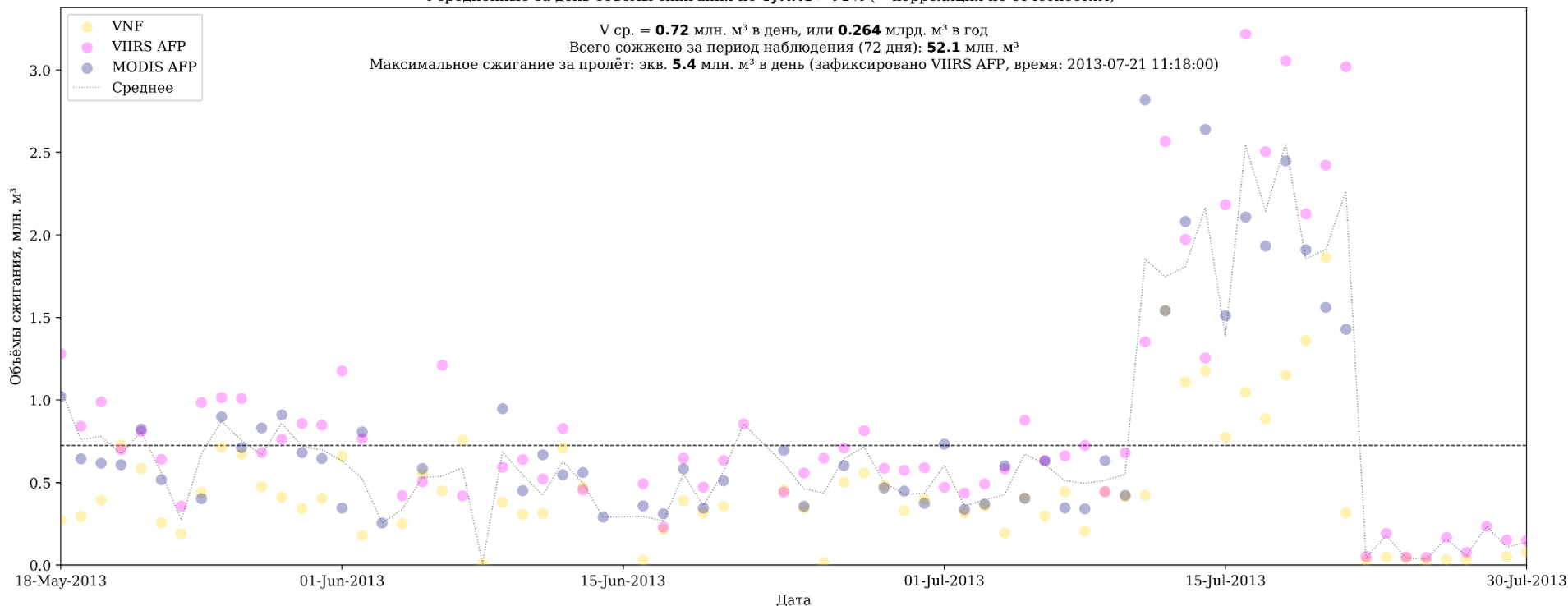
- Заметно постепенное снижение температуры горения при росте сжигаемых объёмов ближе к ликвидации аварии (обведённая область).
- Появление детекций с меньшей интенсивностью в 2017–2019 гг. — нормально функционирующий факел на объекте сбора нефти месторождения в ~1 км от места аварии в 2013 г.

Авария: Анастасиевско-Троицкое м/р, 18.05–30.07 2013

(Краснодарский край, 85 км З от Краснодара, lat/lon: 45.1606° с. ш. 37.8816° в. д.)

Anastasyevsko-Troitskoye (Well 249)
Усреднённые за день объёмы сжигания по **сумме > 75%** (~ корреляция по отчётностям)

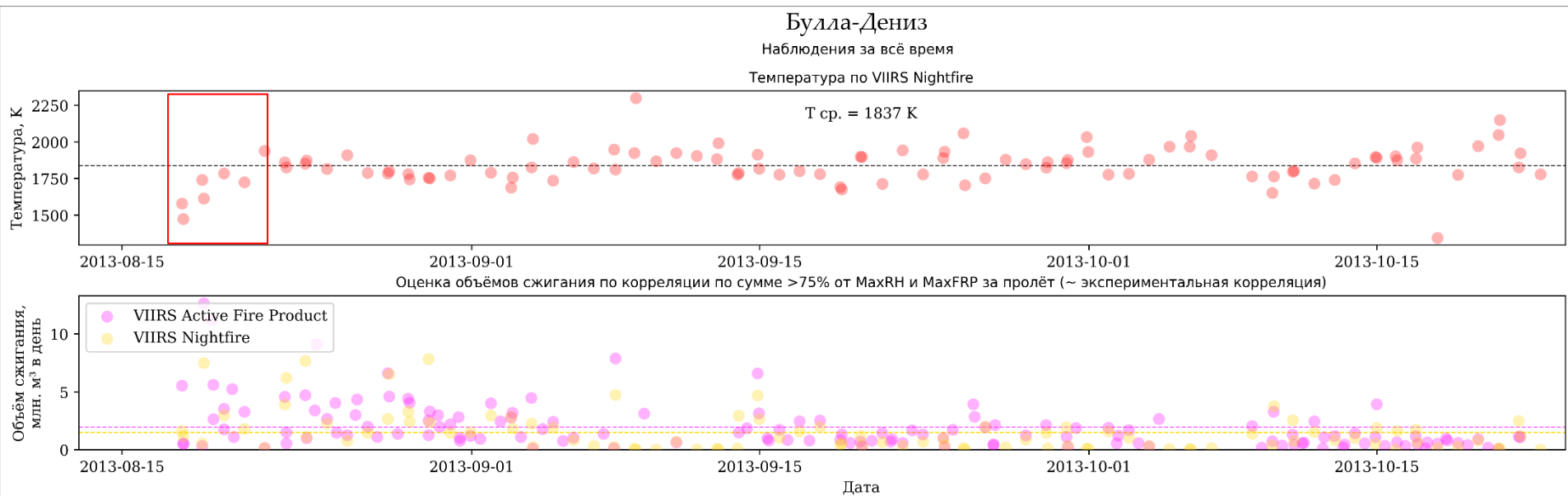
V ср. = **0.72** млн. м³ в день, или **0.264** млрд. м³ в год
Всего сожжено за период наблюдения (72 дня): **52.1** млн. м³
Максимальное сжигание за пролёт: экв. **5.4** млн. м³ в день (зафиксировано VIIRS AFP, время: 2013-07-21 11:18:00)



- Выделяется три этапа развития и ликвидации аварии:
 - Монотонное горение: 18.05.2013 — 10.07.2013;
 - Резкий рост сжигания (и снижение температуры): 11.07.2013 — 21.07.2013;
 - Резкое снижение интенсивности горения: 22.07.2013 — 30.07.2013.

Авария: м/р Булла-Дениз, 17.08–24.10.2013

(Азербайджан, 60 км к Ю от Баку, lat/lon: 39.8585° с. ш., 49.7921° в. д.)



- [18.08.2013] «Огонь охватил разведочную скважину № 90 в северо-восточном крыле "Булла Дениз" 17 августа. Глубина моря на месторождении составляет 26,5 метра. По данным ГНКАР, возгорание произошло во время бурения на глубине 5 868 метров. В 23:30 по местному времени 17 августа произошло открытое фонтанирование газа, после чего начался пожар» — ТАСС.
- [04.09.2013] «...ГНКАР удалось локализовать пламя на платформе и перевести его в вертикальную плоскость...»

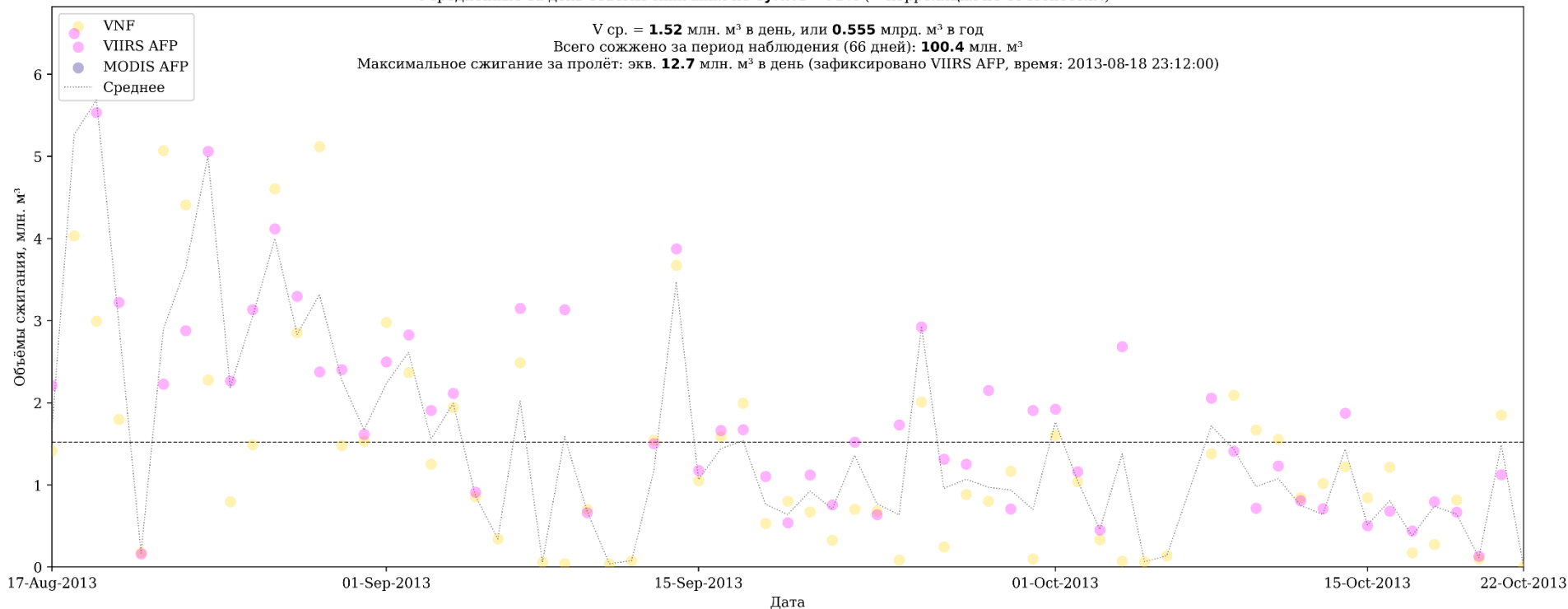
Авария: м/р Булла-Дениз, 17.08–24.10.2013

(Азербайджан, 60 км к Ю от Баку, lat/lon: 39.8585° с. ш., 49.7921° в. д.)

Bulla-Deniz

Усреднённые за день объёмы сжигания по сумме > 75% (~ корреляция по отчётностям)

V ср. = **1.52** млн. м³ в день, или **0.555** млрд. м³ в год
 Всего сожжено за период наблюдения (66 дней): **100.4** млн. м³
 Максимальное сжигание за пролёт: экв. **12.7** млн. м³ в день (зафиксировано VIIRS AFP, время: 2013-08-18 23:12:00)



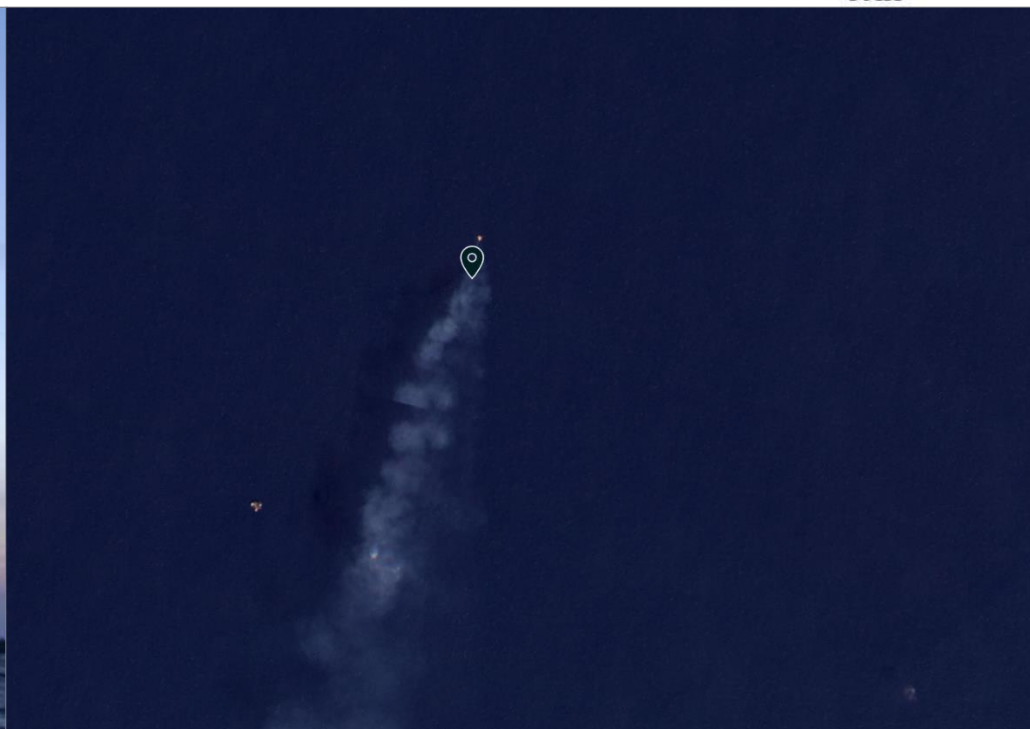
- «Azerbaijan's state energy company SOCAR and the BOOTS & COOTS service of the U.S. Halliburton company checked the mouth of the broken down well in the Bulla-Deniz field in the Azerbaijani sector of the Caspian Sea, SOCAR reported on September 4. The sides conducted measuring work by using special equipments. As a result it was determined that **daily volume of gas yield** in the well amounts to **2.5–3 million cubic meters**», — Azernews.

Авария: м/р Одесское, 20.06.2022–наст. вр.

(Чёрное море, ~120 км от м. Прибойный, Крым, ~130 км к Ю от порта Одессы)



Фото платформы «Черноморнефтегаза»



Снимок горящей скважины Одесского месторождения,
05.08.2022

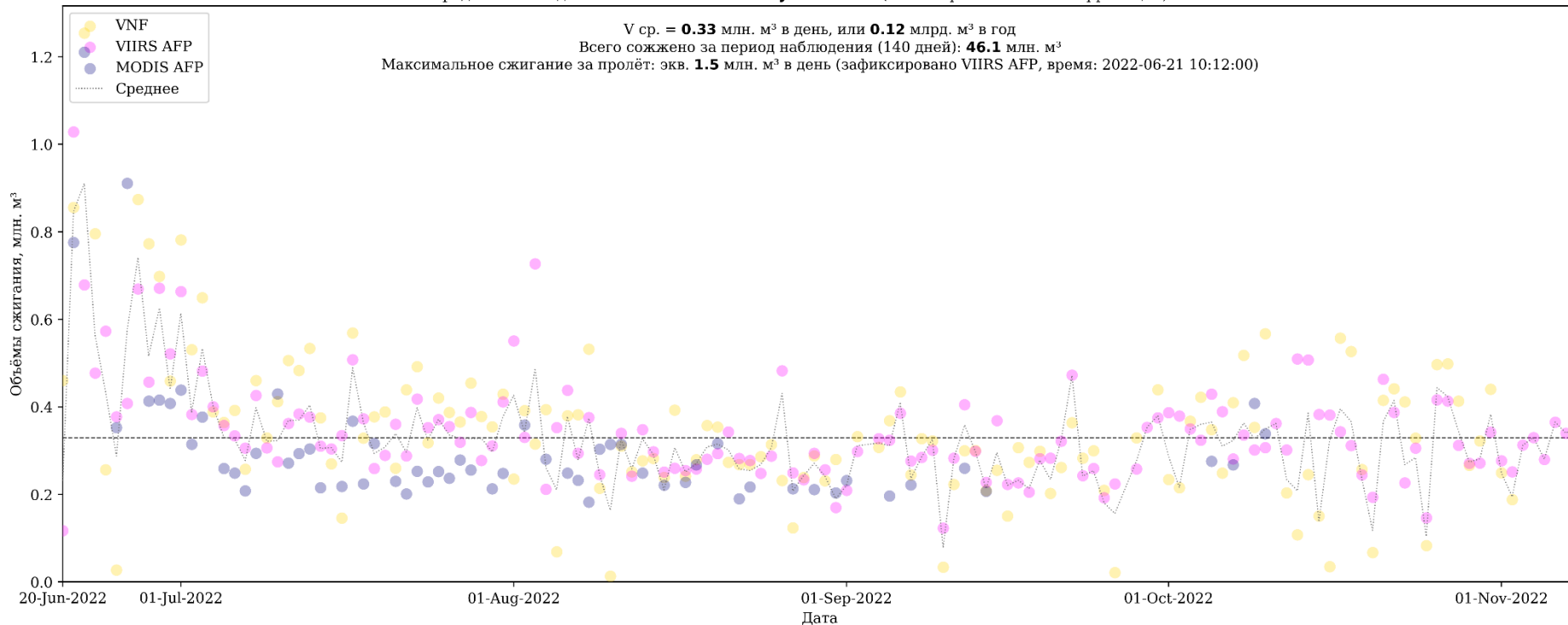
- «Сегодня [20.06] около 8 утра вражескими подразделениями был нанесён удар по буровым платформам "Черноморнефтегаза"», — Аксёнов.
- «21 июня стало известно, что пожар на БК-1 перекинулся на добывающую скважину», — Neftegaz.ru.
- Пожар продолжается по настоящее время (на момент 12.11.2022).

Авария: м/р Одесское, 20.06.2022–наст. вр.

(Чёрное море, ~120 км от м. Прибойный, Крым, ~130 км к Ю от порта Одессы)

Одесское

Усреднённые за день объёмы сжигания по **сумме > 75%** (~ экспериментальная корреляция)



- В 2017 г. уровень добычи газа на месторождении оценивался в 900 млн. м³ газа / год.
- Первая детекция — 20.06, 11:20 (VIIRS Active Fire Product). Макс. горение ~1.5 млн. м³ / день, 21.06, 01:19 (VIIRS Nightfire).
- Оценка среднего уровня сторающего газа в сентябре–ноябре: 0.31 млн. м³ / день.

Выводы и перспективы

- Рассмотрены *перспективы* создания методики мониторинга аварий на объектах нефтегазового промысла, приводящих к возгоранию углеводородов, но *не разработан алгоритм* автоматического выделения подобных аварий.
- + Ретроспективный анализ данных VIIRS Nightfire и привлечение данных Active fire detection algorithm показал, что методика обладает потенциалом оперативного мониторинга *в пределах дня*;
 - Реагирование в течение часов затруднено или невозможно, особенно в случае облачности;
 - ? На данный момент такой практики, исключая случай Одесского м/р, не проводилось.
- + Методика позволяет проводить мониторинг хода развития и ликвидации аварии:
 - На примере аварии на Анастасиевско-Троицком м/р ярко выделяются три стадии развития;
 - На примере аварии на м/р Булла-Дениз приведена сравниваемая с измерениями сервисной компании оценка объёмов сгорающего газа.
- ? Возможна фиксация не преданных огласке аварий или неявных последствий:
 - Например, рост факельного сжигания на месторождениях после аварии на газоперерабатывающем заводе (Локосовский ГПЗ в ХМАО — Югре; нет в презентации).
- Методика не подходит для аварий:
 - Не связанных с возгоранием углеводородов;
 - Малых;
 - Быстро ликвидированных.

Список литературы

Методики VIIRS Nightfire и VIIRS active fire detection data product:

- Elvidge, C.D.; Zhizhin, M.; Baugh, K.E.; Hsu, F.-C.; Ghosh, T. Methods for Global Survey of Natural Gas Flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Data. *Energies* **2016**, 9, 14.
- Elvidge, C.D.; Zhizhin, M.; Hsu, F.-C.; Baugh, K.E. VIIRS NightFire: Satellite Pyrometry at Night. *Remote Sens. Environ.* **2013**, 5, 4423–4449.
- Schroeder, W.; Oliva, P.; Giglio, L.; Csiszar, I.A. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sens. Environ.* **2014**, 143, 85–96.

Публикации по теме доклада:

- Zhizhin, M.; Matveev, A.; Ghosh, T.; Hsu, F.C.; Howells, M.; Elvidge, C. Measuring Gas Flaring in Russia with Multispectral VIIRS Nightfire. *Remote Sens. Environ.* **2021**, 13(16), 3078.
- Matveev, A.M.; Zhizhin, M.N.; Poyda, A.A. Variations in gas flaring in Russia observed using multispectral nighttime remote sensing. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, **2020**, 17(6), pp. 37–44.
- Матвеев А.М., Жижин М.Н., Пойда А.А. Мониторинг пространственно-временных вариаций тепловых полей при добыче и переработке углеводородов при помощи мультиспектрального ночного дистанционного зондирования Земли. Материалы XVII Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 11–15 ноября **2019**.
- Матвеев А.М., Жижин М.Н., Пойда А.А. Применение алгоритма спутникового мониторинга сжигания попутного нефтяного газа VIIRS Nightfire на территории России и его результаты. Материалы XVI Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 12–16 ноября **2018**.