

# Применение алгоритма спутникового мониторинга сжигания попутного нефтяного газа VIIRS Nightfire на территории России и его результаты

Матвеев А.М.<sup>1</sup>, Жижин М.Н.<sup>1, 2, 3</sup>, Пойда А.А.<sup>1, 4</sup>

(1) РАНХиГС

(2) Институт космических исследований РАН

(3) Университет Колорадо в Боулдере

(4) Курчатовский институт

## Актуальность и задачи работы

- Сжигание попутного нефтяного газа (ПНГ) — экологически и экономически нерациональный способ его утилизации. Сегодня на его долю приходится 1% мировой эмиссии CO<sub>2</sub>.
- У большинства расходомеров сжигания ПНГ на месторождениях существуют собственные проблемы, обуславливающие возможную ошибку от 8 до 30% при допустимом ГОСТом отклонении в  $\pm 5\%$ . До недавнего времени многие факелы в России (до 50%) не были оснащены расходомерами, эмиссия рассчитывались по косвенным методикам, допускающим заметную ошибку.
- Статистика по ПНГ является коммерческой тайной нефтегазовых компаний, сообщаемой Росприроднадзору и редко доступной в открытом виде.
- Вследствие этого существует необходимость независимого инструментального контроля над объёмами сжигания ПНГ, в роли которого сегодня выступает спутниковый мониторинг.

### Задачи:

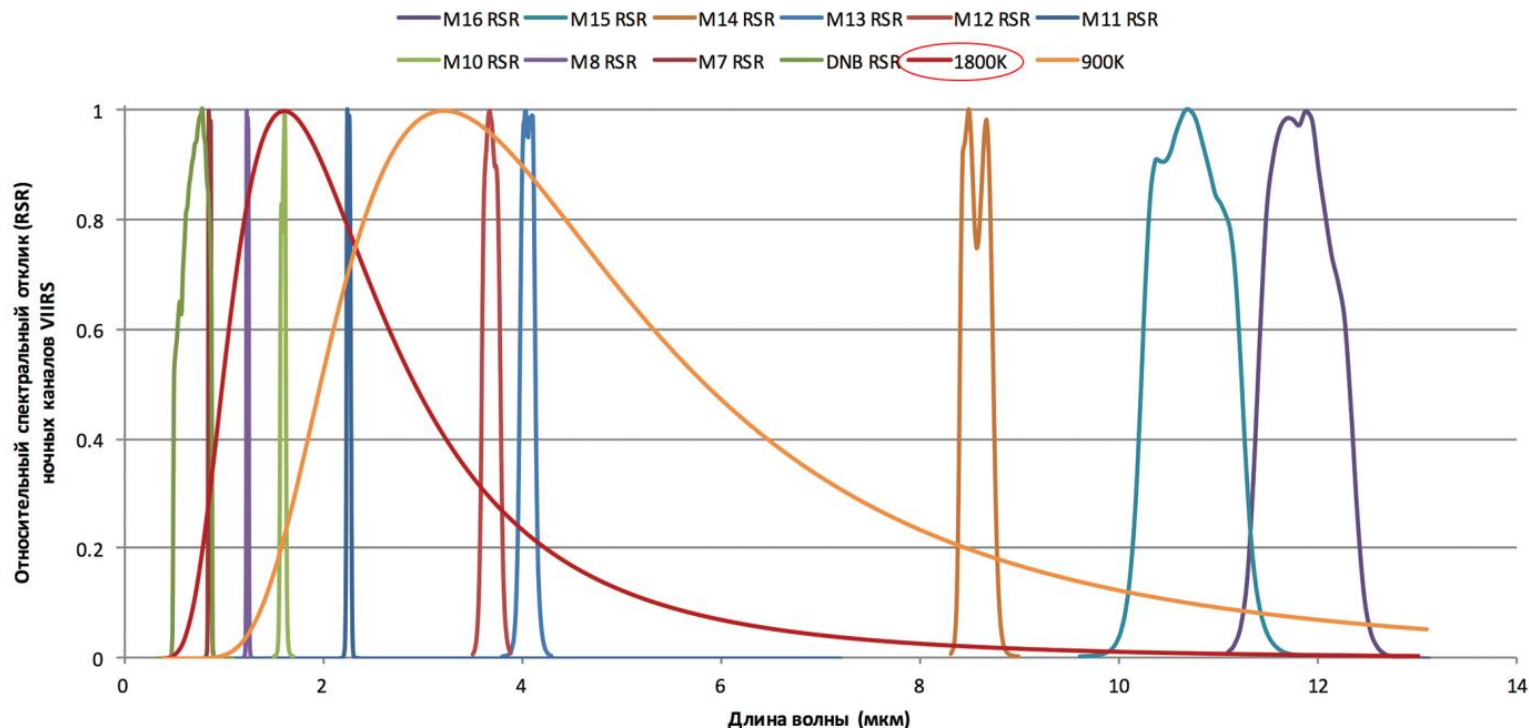
- Отработать методику спутникового мониторинга VIIRS Nightfire (VNF)
- Создать каталог факелов сжигания ПНГ в России
- Сравнить данные с официальными источниками и провести гипотетический расчёт потерь от сжигания ПНГ

## Методика

- Измерения характеристик «горячих точек» на поверхности Земли производится по формуле Планка:

$$B_{\lambda}(T) = \varepsilon \times \frac{2hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1},$$

- Газовые факелы имеют высокую температуру (в ср.  $1720 \pm 60$  К), поэтому их «отклик» максимален в SWIR (ближний ИК), в отличие от пожаров, фиксируемых в среднем ИК.

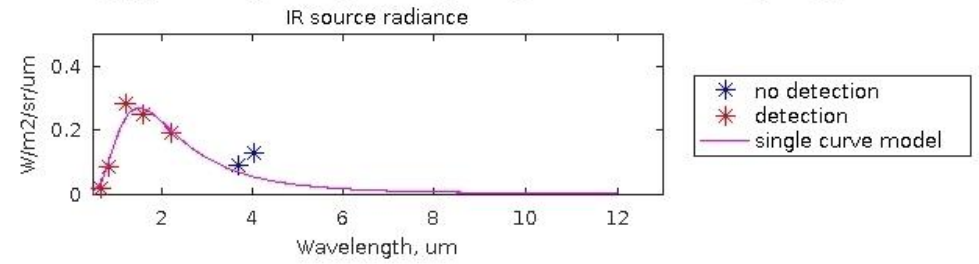


## Методика

- Используется ночная съёмка, позволяющая элиминировать «шум» от солнца в SWIR. (Сегодня большинство методов принимает данные MWIR- и LWIR-каналов, незашумлённые днём.) Используется информация со всех 9 работающих в ночное время ИК-диапазонов VIIRS.
- Мультиспектральные детекции дают информацию о температуре и площади источника с помощью моделированию кривой Планка. В случае мелкомасштабной съёмки необходимо учитывать субпиксельную фиксацию энергии излучения источника ( $S_{\text{факел}} \ll S_{\text{pixel}}$ ) сенсором.
- Для получаемых снимков используются маски облаков.
- Учитывается влияние магнитных аномалий.
- Атмосферная коррекция не применяется, поскольку выявлено её незначительное (<1%) влияние на результат. Рассматривается возможность её учёта.
- Учитывается геометрия факела и угол наблюдения спутника.
- Для выделения факела используются только источники со ср.  $T > 1\ 300\ \text{K}$ , детектированные более трёх раз за год. Большинство пожаров отсекается за счёт меньшего постоянства / более низкой  $T$ , некоторые вручную; другие источники имеют более низкую  $T$ .
  - В рамках России точность подобного алгоритма выделения факелов составила 98,7%. Некоторые факелы (3,3%) имеют более низкую среднюю температуру; они были добавлены вручную.

**Combustion parameters:**

ID=VNF\_npp\_d20181023\_t2151364\_e2152588\_b36214\_x0695967E\_y608144N\_i0731\_s1644\_v30  
Lat=60.814400 Lon=69.596687 deg. Time=2018/10/23 21:52:56  
Temperature source=1907 deg. K Temperature background=? deg. K  
Radiant heat intensity=1.96 W/m2 Radiant heat=1.13 MW  
Source footprint=1.51 m2 Local time=2018/10/24 02:52:56  
Cloud state=cloudy Atmosphere corrected=no  
File=SVM10\_npp\_d20181023\_t2151364\_e2152588\_b36214\_c2018102323217687790\_noac\_ops.h5

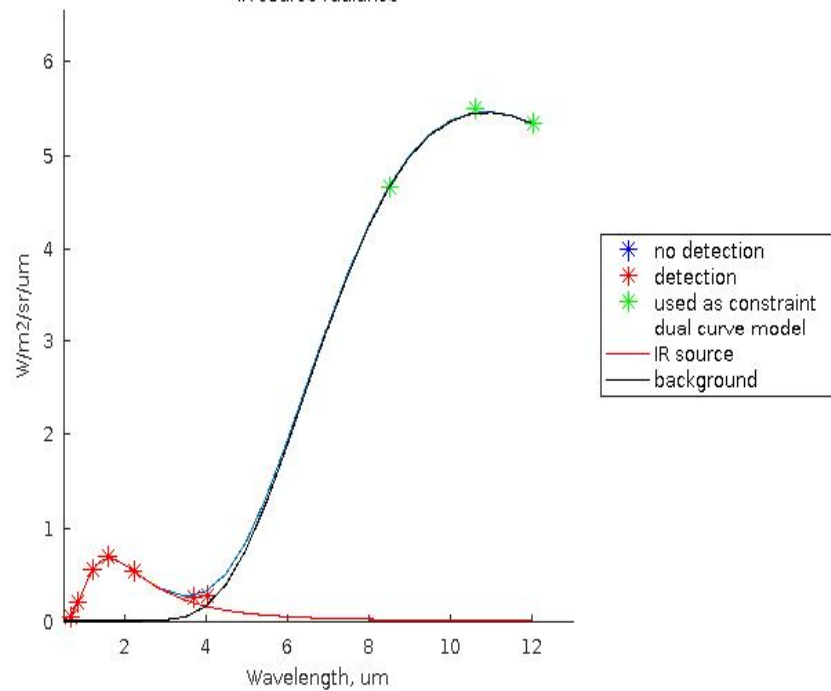


Маршруты: [сюда](#) — [отсюда](#)

**Combustion parameters:**

ID=VNF\_npp\_d20181023\_t2151364\_e2152588\_b36214\_x0726181E\_y610225N\_I0626\_s1824\_v30  
Lat=61.022453 Lon=72.618080 deg. Time=2018/10/23 21:52:46  
Temperature source=1803 deg. K Temperature background=266 deg. K  
Radiant heat intensity=5.14 W/m<sup>2</sup> Radiant heat=3.20 MW  
Source footprint=5.34 m<sup>2</sup> Local time=2018/10/24 02:52:46  
Cloud state=clear Atmosphere corrected=no  
File=SVM10\_npp\_d20181023\_t2151364\_e2152588\_b36214\_c20181023233217687790\_noac\_ops.h5

IR source radiance



Маршруты: [сюда](#) - [отсюда](#)



## Методика

- Энергия излучения вычисляется по закону Стефана — Больцмана:

$$RH = \sigma T^4 S.$$

- Производится корреляция полученных оценок с отчётами, публикуемыми международной ассоциацией CEDIGAZ. Оценки энергии излучения суммируются в рамках векторов политических границ, коррелируются с отчётами CEDIGAZ и распределяются по факелам сообразно их энергии излучения.
- Для учёта нелинейности в корреляции свечения факела и объёмов сжигания, в формулу вводится эмпирически вычисленный поправочный коэффициент  $D$ , равный 0,7.

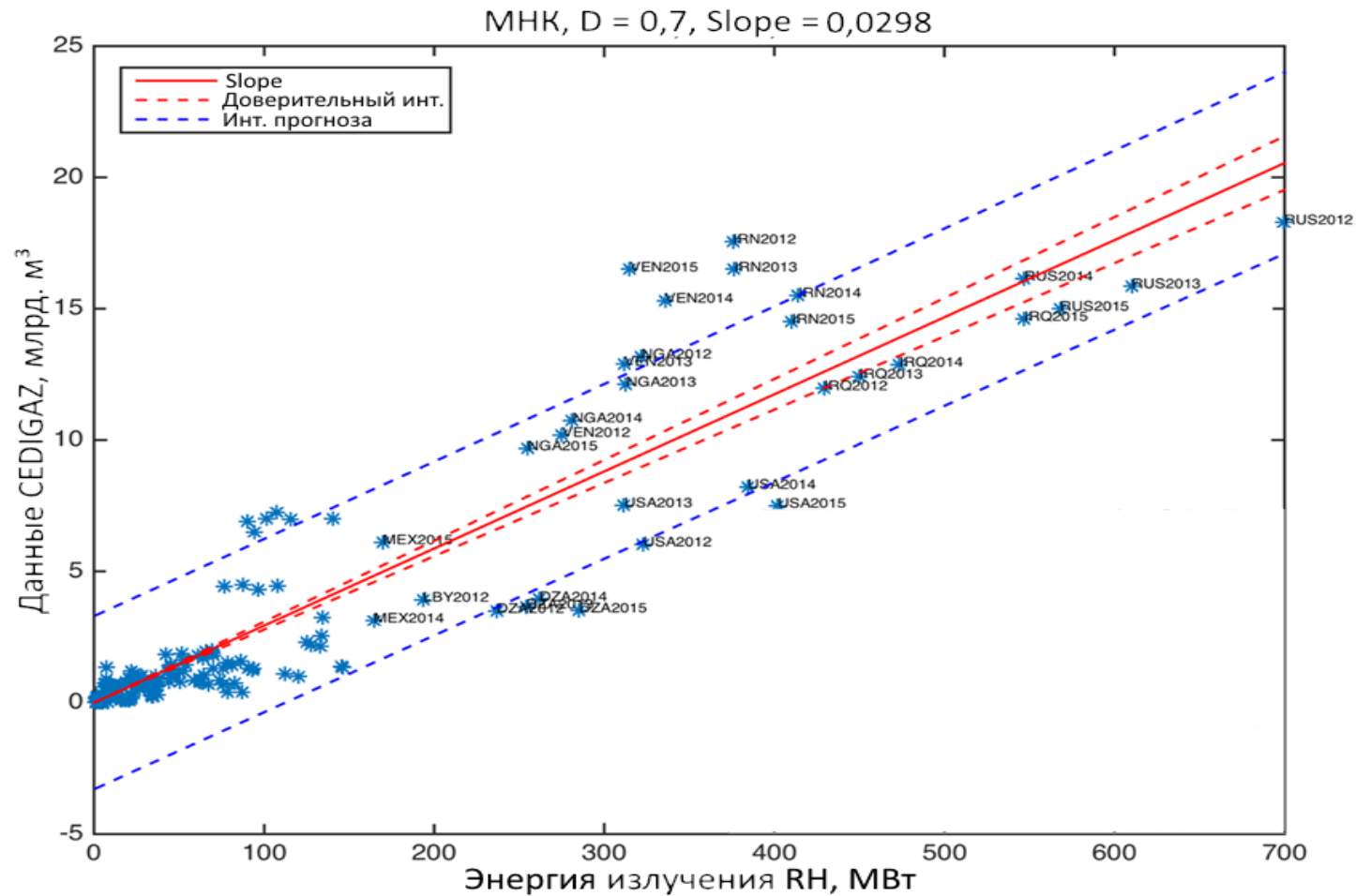
$$RH' = \sigma T^4 S^D.$$

- Энергия свечения  $RH$  умножается на коэффициент пропорциональности *Slope* (0,0298), вычисленный для линейной регрессии. Формула Стефана — Больцмана преобразуется в:

$$V = \sigma T^4 S^D \times Slope.$$

- В работе использованы данные за март 2012 — 2017 гг.

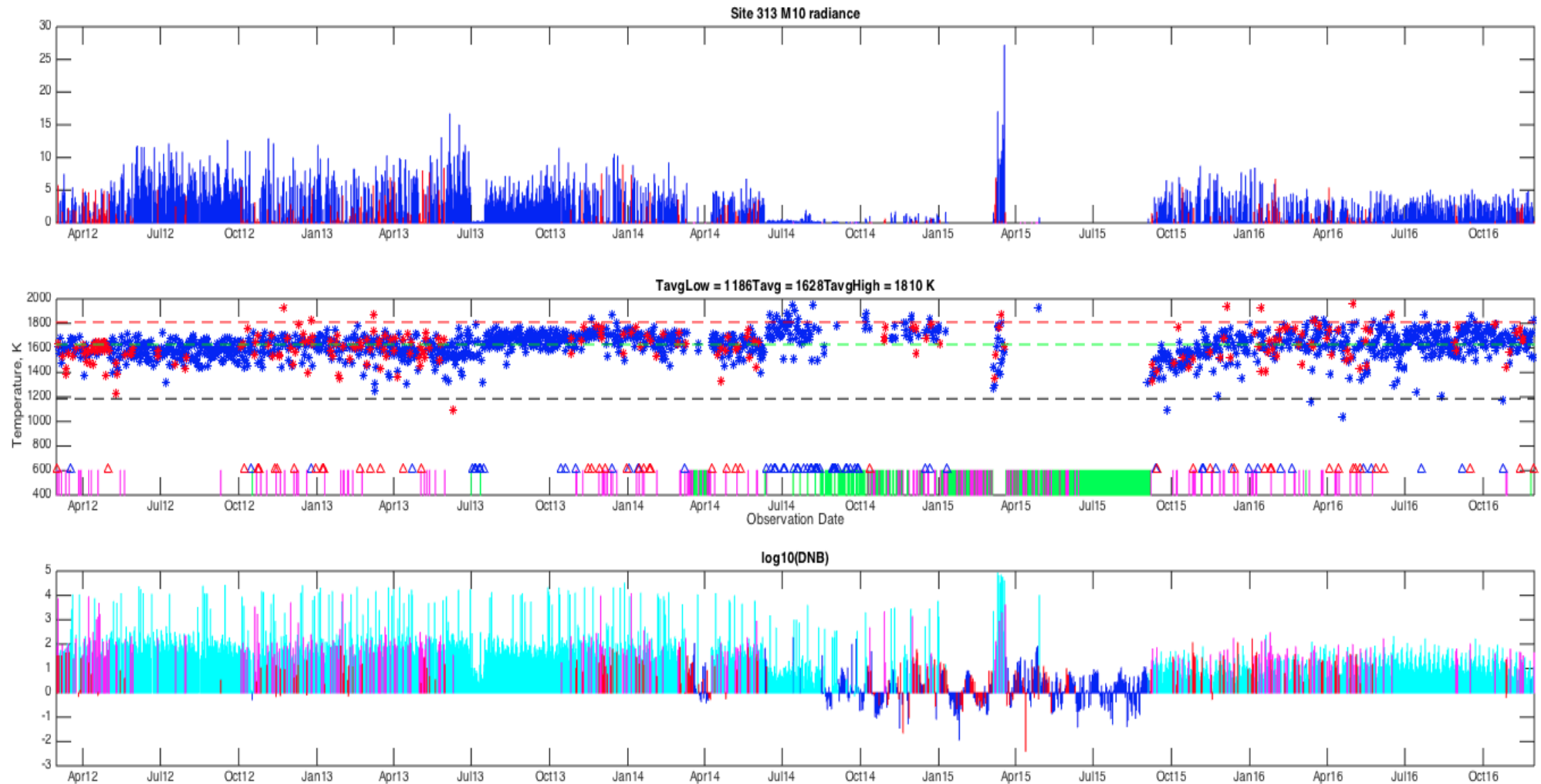
## Методика: калибровка по данным CEDGIGAZ



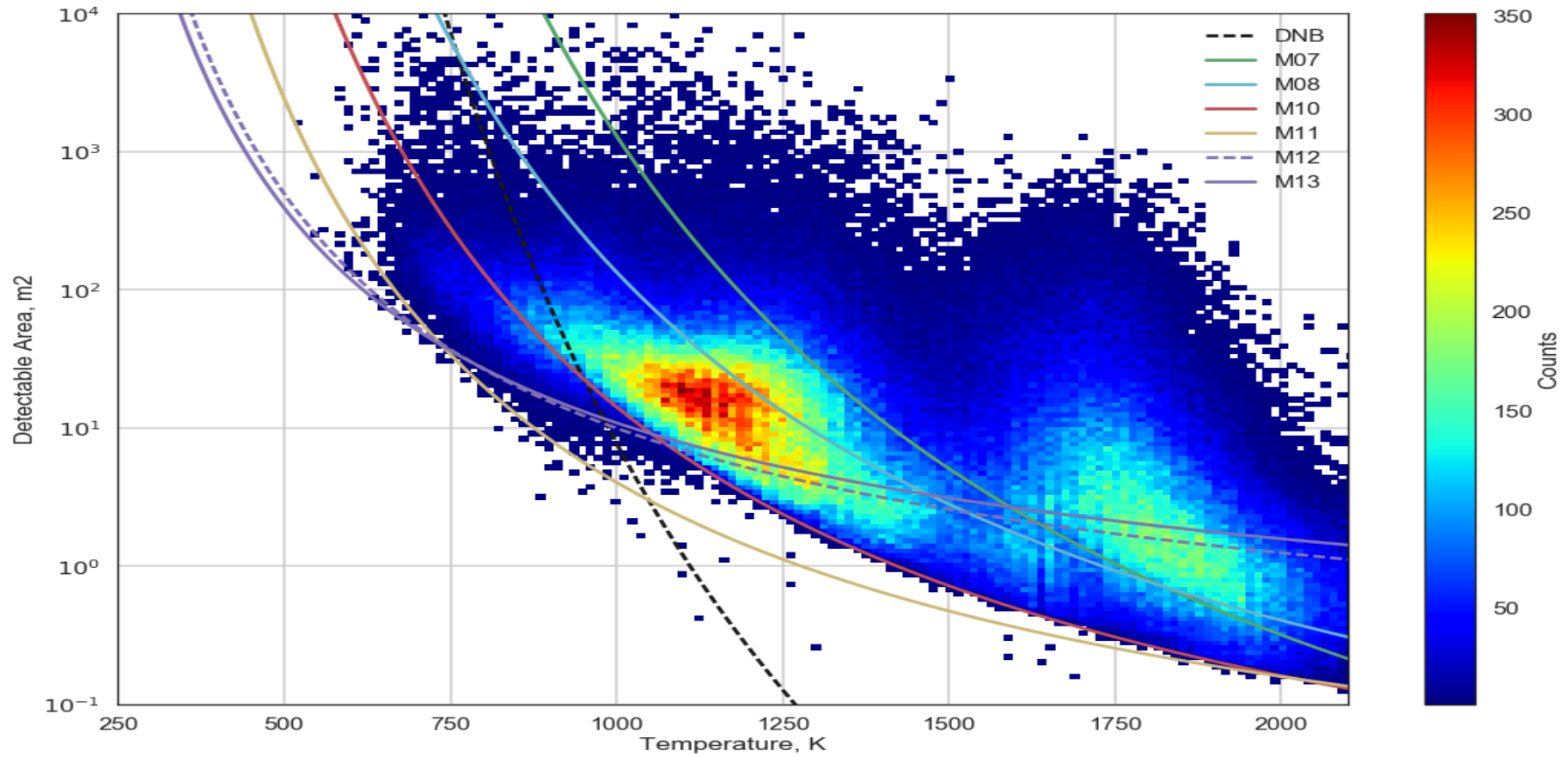
МНК — метод наименьших квадратов; Slope — угол наклона прямой,  $D = s^D$ .



Пример временного ряда для факела ( $\downarrow$ : излучение в SWIR / T / излучение в видимом спектре)



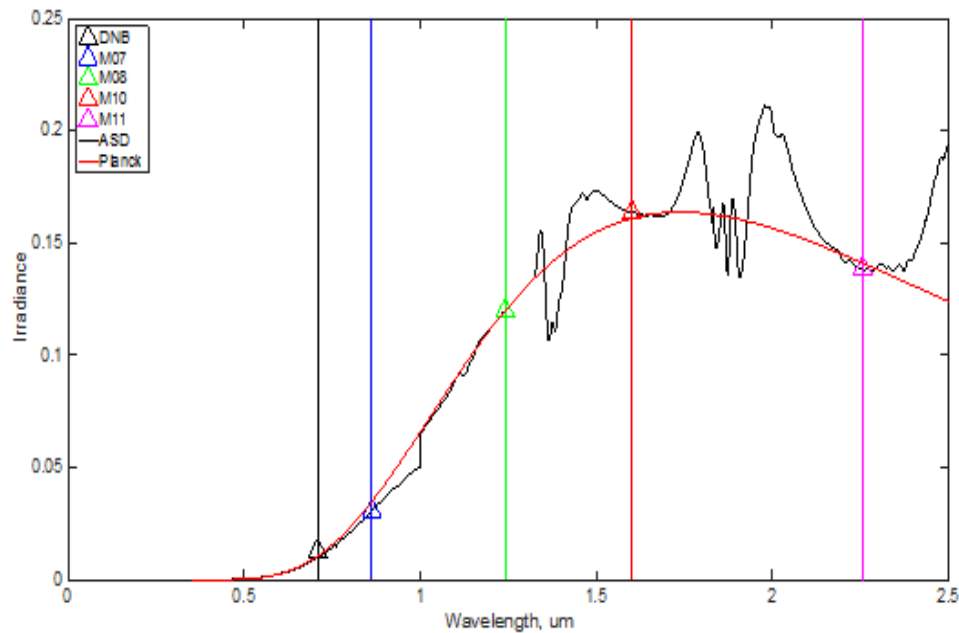
## Методика: порог чувствительности



NB: детекция только в одном канале не позволяет построить кривую Планка для источника, т. е. оценить его температуру и площадь.

## Экспериментальная верификация алгоритма

### Наземная проверка: тестовое факельное хозяйство, Оклахома, США

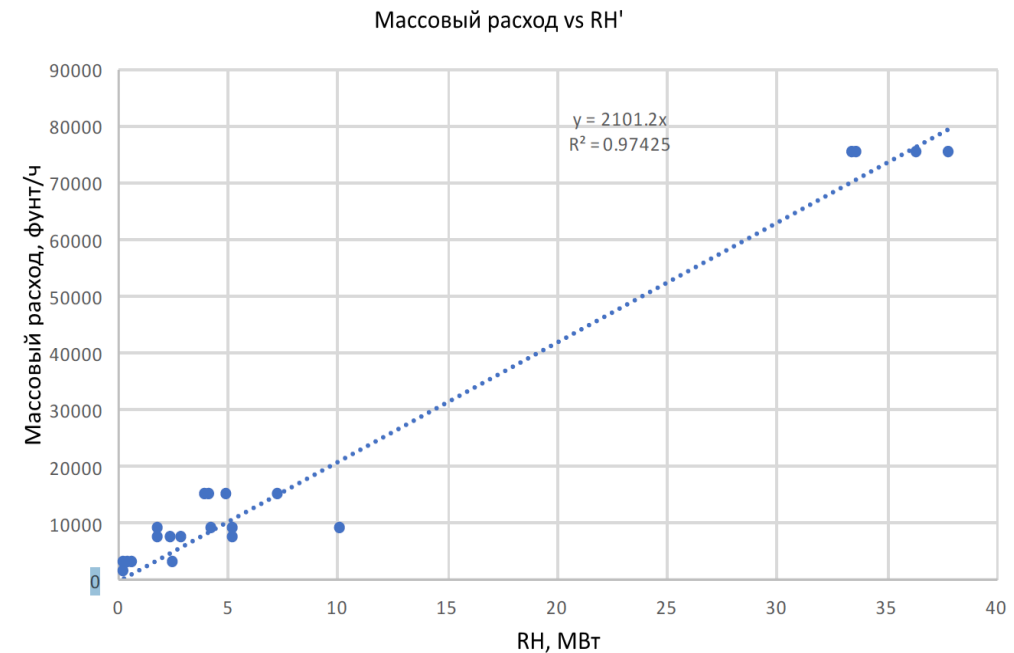


Спектрометры, видимый — SWIR:

Красным цветом — VIIRS;

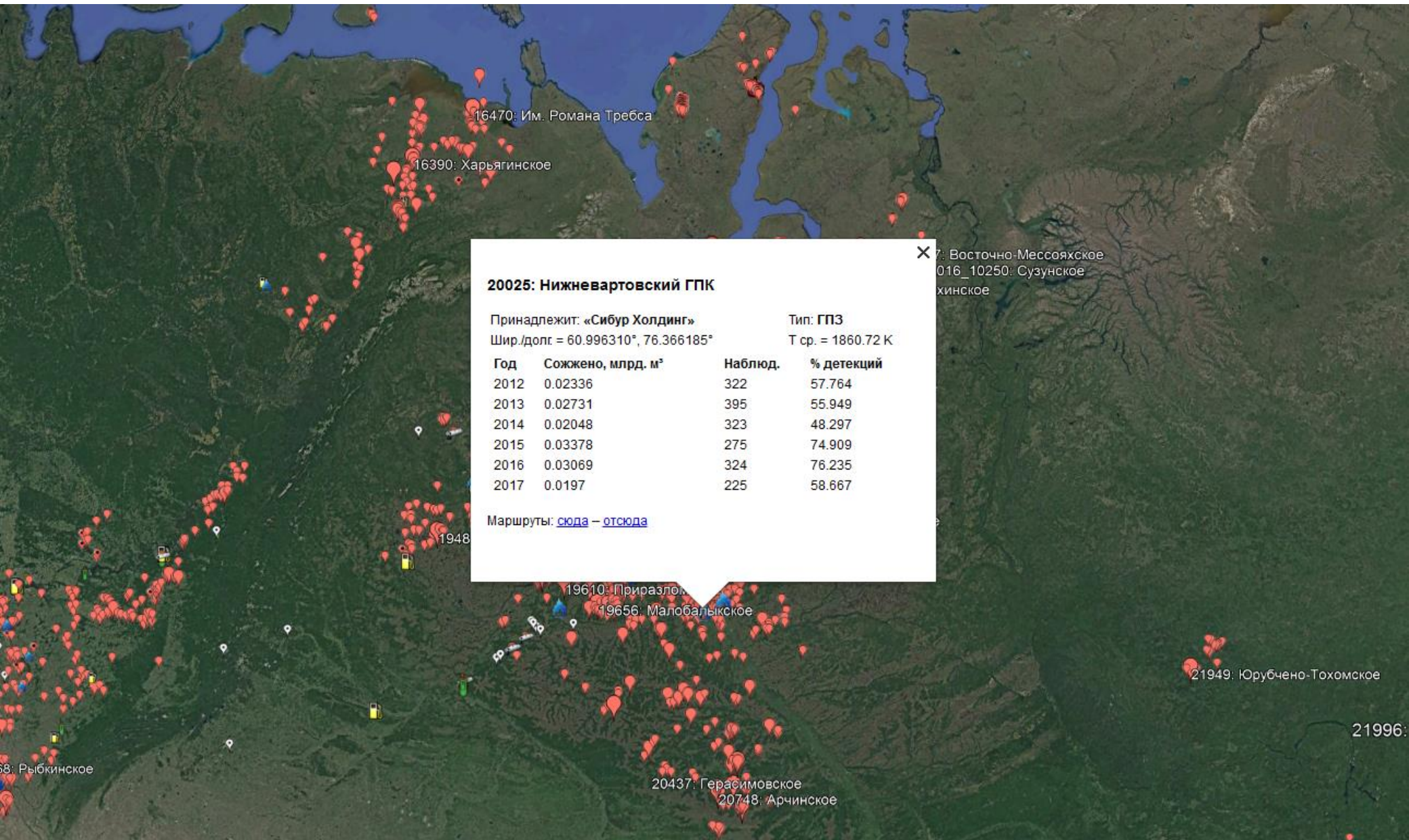
Чёрным — наземные наблюдения

(волатильность данных наземного спектрометра вызвана присутствием водяного пара в атмосфере)



Корреляция фиксируемой энергии излучения факела (RH, x) с массовым расходом смеси в час (flowrate, y)

1 фунт  $\approx$  0,454 кг;  $R^2 = 97,4\%$



**20025: Нижневартовский ГПК**

Принадлежит: «Сибур Холдинг»  
Шир./долг. = 60.996310°, 76.366185°

Тип: ГПЗ  
Т ср. = 1860.72 К

Год	Сожжено, млрд. м³	Наблюд.	% детекций
2012	0.02336	322	57.764
2013	0.02731	395	55.949
2014	0.02048	323	48.297
2015	0.03378	275	74.909
2016	0.03069	324	76.235
2017	0.0197	225	58.667

Маршруты: [сюда](#) – [отсюда](#)

16470: Им. Романа Требса

16390: Харьягинское

X 7: Восточно-Мессояхское  
016\_10250: Сузунское  
хинское

1948

19610: Приразло

19656: Малобалыкское

21949: Юрубчено-Тохомское

21996:

68: Рыбкинское

20437: Герасимовское

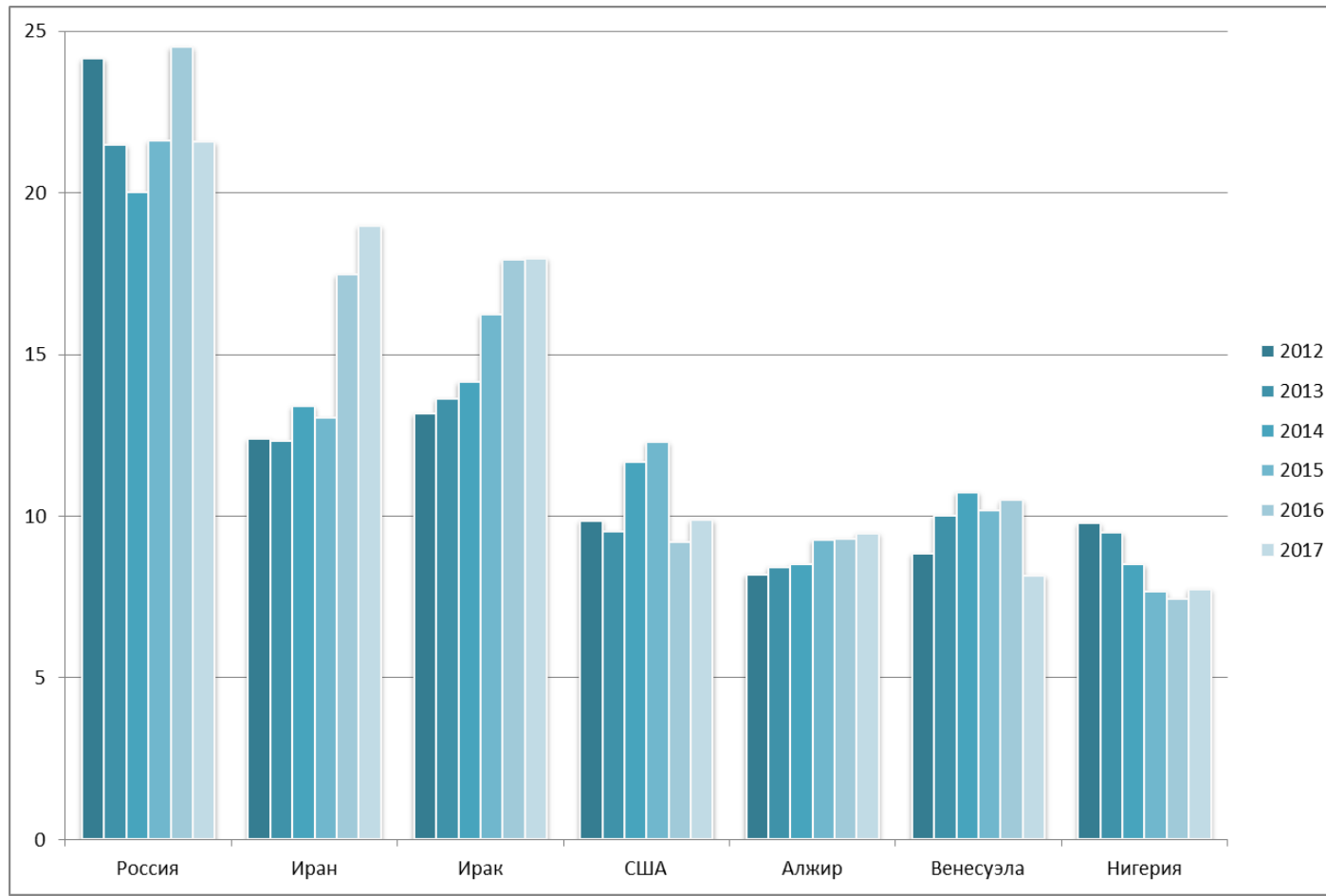
20748: Арчинское

## Пример каталога факелов сжигания ПНГ на территории России

ID	Регион	Месторождение	Компания	Тип месторождения	Широта	Долгота	Частота обнаружения (%)							V сожжённого ПНГ (млн. м <sup>3</sup> )						
							2012	2013	2014	2015	2016	2017	2012	2013	2014	2015	2016	2017		
16522	Респ. Крым	Карлавское	«НК "Роснефть"»	Газоконденсатное	45,509	32,899	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
16656	Краснодарский край	Курчанское	«НК "Роснефть"»	Газонефтяное	45,305	37,503	8,9	8,7	0,6	0,6	0,0	1,2	9,2	5,2	0,4	0,3	0,0	0,5		
16658	Краснодарский край	Курчанское	«НК "Роснефть"»	Газонефтяное	45,280	37,536	7,2	1,8	7,6	7,7	27,5	6,3	1,4	0,9	1,5	1,5	6,1	1,8		
16666	Краснодарский край	Прибрежное	«Газпром»	Нефтегазоконденсатное	45,513	37,604	92,3	78,1	69,9	47,2	41,5	30,4	36,7	25,0	20,1	12,3	10,2	5,8		
16674	Краснодарский край	Восточно-Прибрежное	«Газпром»	Нефтегазоконденсатное	45,514	37,740	0,3	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0		
16675	Краснодарский край	Восточно-Прибрежное	«Газпром»	Нефтегазоконденсатное	45,478	37,755	0,3	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0		
16678	Краснодарский край	Восточно-Прибрежное	«Газпром»	Нефтегазоконденсатное	45,481	37,781	4,2	3,4	2,8	0,3	0,0	0,0	1,0	0,4	0,4	0,1	0,0	0,0		
16681	Краснодарский край	Западно-Беликовское	«НК "Роснефть"»	Нефтяное	45,477	37,876	4,2	4,6	35,7	0,8	0,0	0,0	0,5	0,6	7,0	0,1	0,0	0,0		
16682	Краснодарский край	Анастасьевско-Троицкое	«НК "Роснефть"»	Нефтяное	45,161	37,882	0,0	27,7	0,0	0,0	0,0	21,4	0,0	104,4	0,0	0,0	0,0	7,5		
16683	Краснодарский край	Морозовское	«НК "Роснефть"»	Нефтяное	45,505	37,888	62,2	38,0	13,3	52,3	5,1	4,4	16,9	9,2	5,4	17,0	2,1	1,2		
16688	Краснодарский край	Славянское	«НК "Роснефть"»	Газовое	45,313	38,007	65,9	55,6	70,1	70,3	58,0	39,2	23,3	16,7	23,6	21,6	17,5	15,4		
16691	Краснодарский край	Украинское	«НК "Роснефть"»	Газонефтяное	44,886	38,095	3,8	4,1	4,0	2,0	1,0	7,4	0,4	0,5	0,6	0,3	0,2	1,1		
16706	Краснодарский край	Калужское	«НК "Роснефть"»	Нефтегазоконденсатное	44,771	38,961	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
16707	Краснодарский край	Дыш	«НК "Роснефть"»	Газонефтяное	44,751	39,015	83,9	79,3	82,7	87,5	44,7	76,0	28,0	23,1	27,1	37,7	17,2	29,7		
16708	Краснодарский край	Дыш	«НК "Роснефть"»	Газонефтяное	44,723	39,069	9,7	94,8	94,0	91,7	87,4	96,7	3,2	44,8	47,1	77,6	83,7	69,0		
16712	Краснодарский край	Ключевое	«НК "Роснефть"»	Газонефтяное	44,661	39,226	0,0	0,0	13,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	5,7	0,0	0,0		
16732	Респ. Адыгея	Кошехабльское	JKX Oil & Gas	Газоконденсатное	44,914	40,420	4,5	1,0	0,3	0,3	0,0	0,0	3,7	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0		
16733	Респ. Адыгея	Кошехабльское	JKX Oil & Gas	Газоконденсатное	44,931	40,423	0,0	1,0	7,8	0,6	0,0	0,0	0,0	0,9	4,1	0,6	0,0	0,0		
16746	Волгоградская обл.	Кудиновское	«ЛУКОЙЛ»	Нефтяное	49,714	43,805	1,8	1,1	2,8	1,9	32,1	46,0	0,4	0,4	0,9	0,5	4,4	8,0		
16747	Волгоградская обл.	Кудиновское	«ЛУКОЙЛ»	Нефтяное	49,828	43,956	32,5	8,2	0,3	4,3	50,0	14,8	9,7	2,2	0,0	1,7	17,1	4,2		
16748	Волгоградская обл.	Весеннее	«ЛУКОЙЛ»	Газоконденсатное	49,443	44,100	0,0	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0		
16750	Волгоградская обл.	Терсинское	«ЛУКОЙЛ»	Нефтяное	49,443	44,111	4,6	2,5	2,3	2,4	0,0	0,0	0,6	0,4	0,5	0,4	0,0	0,0		
16753	Волгоградская обл.	Ключевское	«ЛУКОЙЛ»	Нефтяное	50,067	44,234	0,6	5,3	6,9	1,1	0,0	1,2	0,3	1,7	2,1	0,5	0,0	0,4		
16754	Ставропольский край	Прасковейское	«НК "Роснефть"»	Нефтяное	44,737	44,332	3,2	1,3	23,6	24,1	30,2	28,3	0,4	0,2	4,8	4,7	5,5	5,3		
16755	Волгоградская обл.	Новокрасинское	«ЛУКОЙЛ»	Нефтяное	50,910	44,533	0,0	0,3	14,3	71,2	85,4	60,3	0,0	0,0	1,9	32,7	36,2	31,5		
16757	Волгоградская обл.	Северо-Романовское	«ЛУКОЙЛ»	Нефтяное	49,987	44,600	0,3	10,5	1,3	2,1	0,0	0,0	0,0	2,1	0,2	0,3	0,0	0,0		
16761	Волгоградская обл.	Миросниковское	«ЛУКОЙЛ»	Нефтяное	50,555	44,662	0,0	3,0	0,0	1,2	0,0	6,2	0,0	1,0	0,0	0,5	0,0	1,6		
16762	Волгоградская обл.	Коробковское	«ЛУКОЙЛ»	Нефтегазоконденсатное	50,343	44,660	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
16765	Ставропольский край	Ачикулаское	«НК "Роснефть"»	Нефтяное	44,672	44,725	57,7	66,3	51,9	61,2	72,0	52,4	14,9	17,3	14,6	16,6	19,5	13,3		

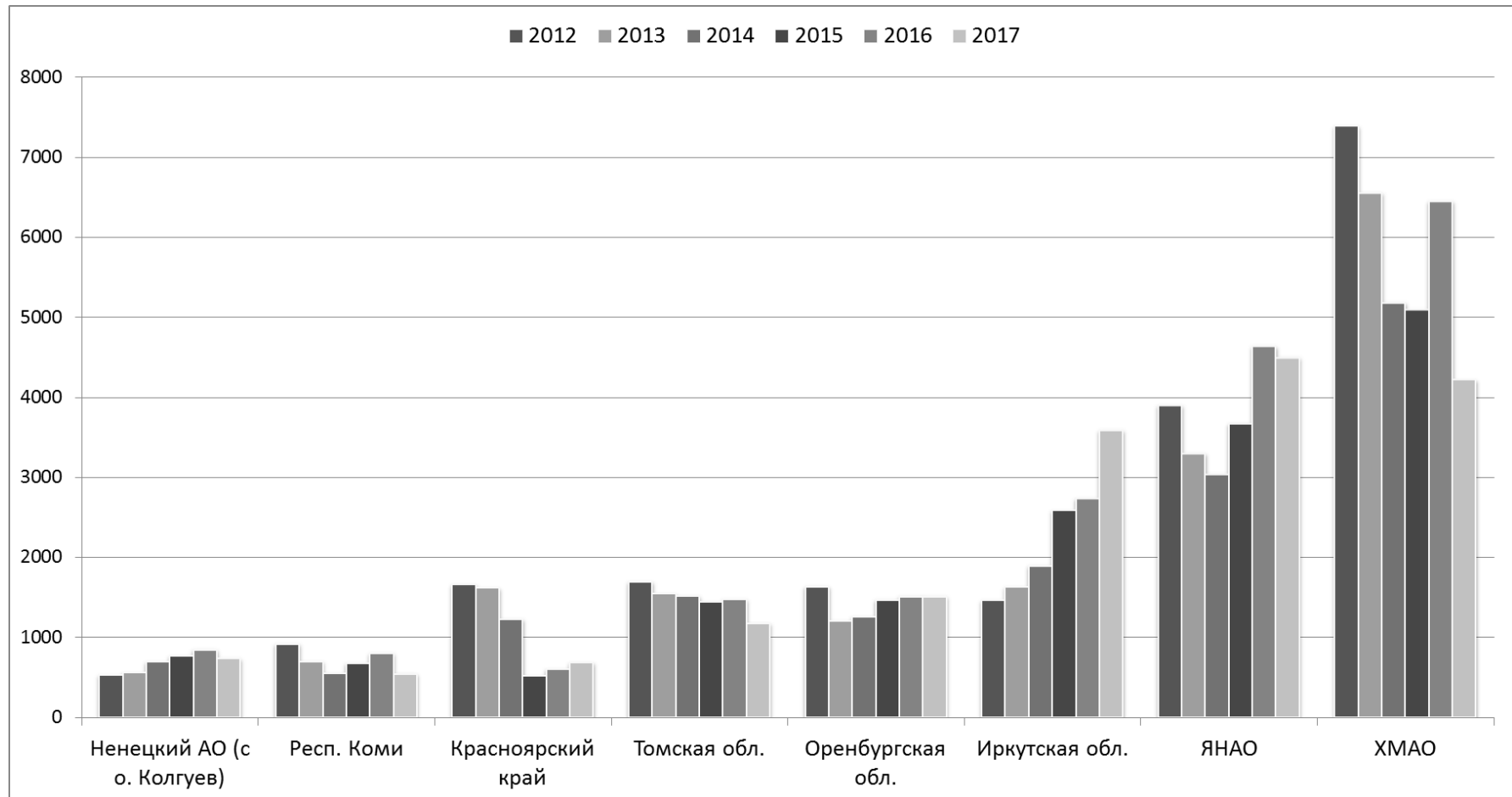
## Результаты

### Страны с максимальными уровнями сжигания ПНГ (в млрд. м<sup>3</sup>):



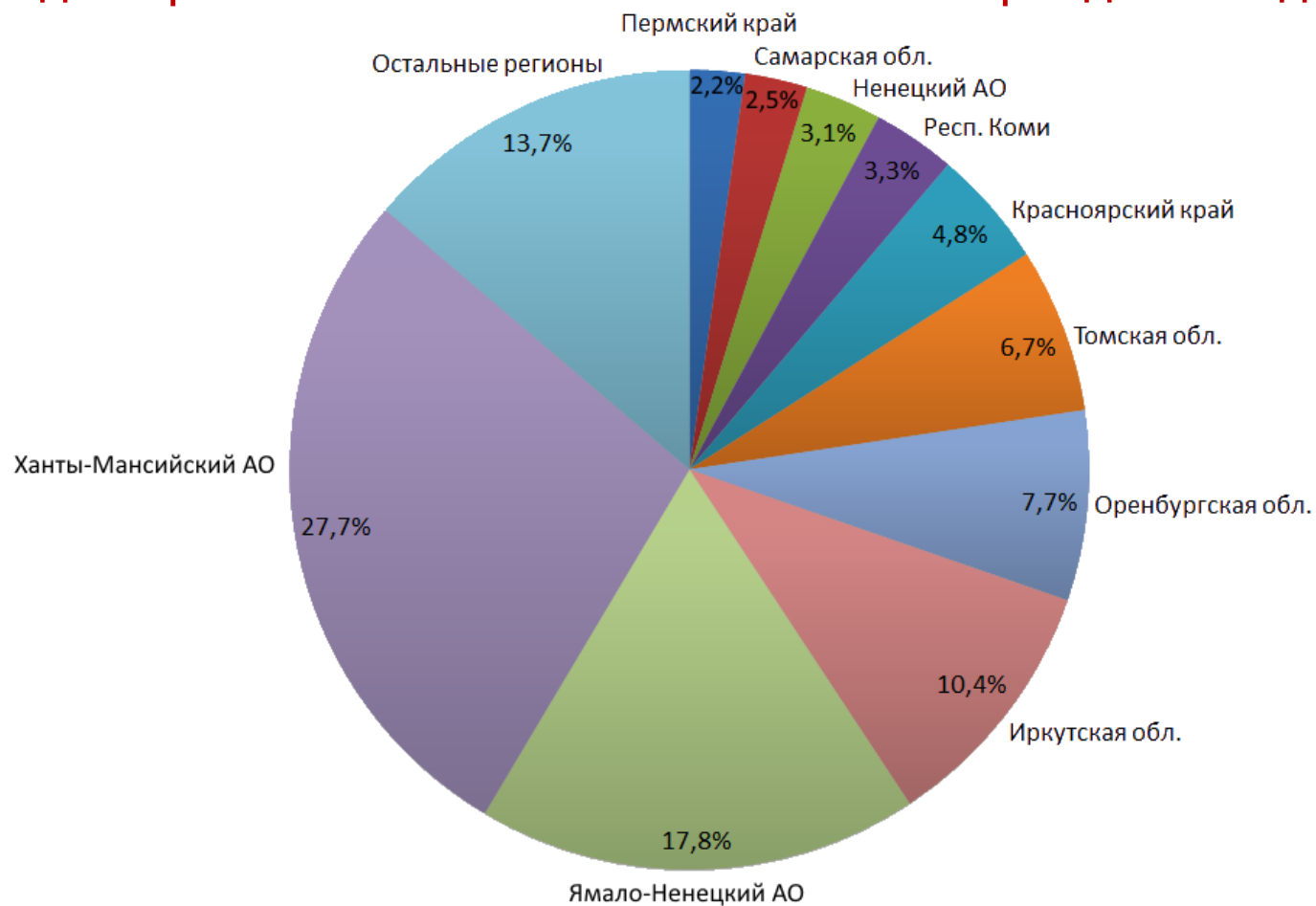
## Результаты

### Крупнейшие субъекты РФ по суммарному сжиганию ПНГ (в млн. м<sup>3</sup>):



## Результаты

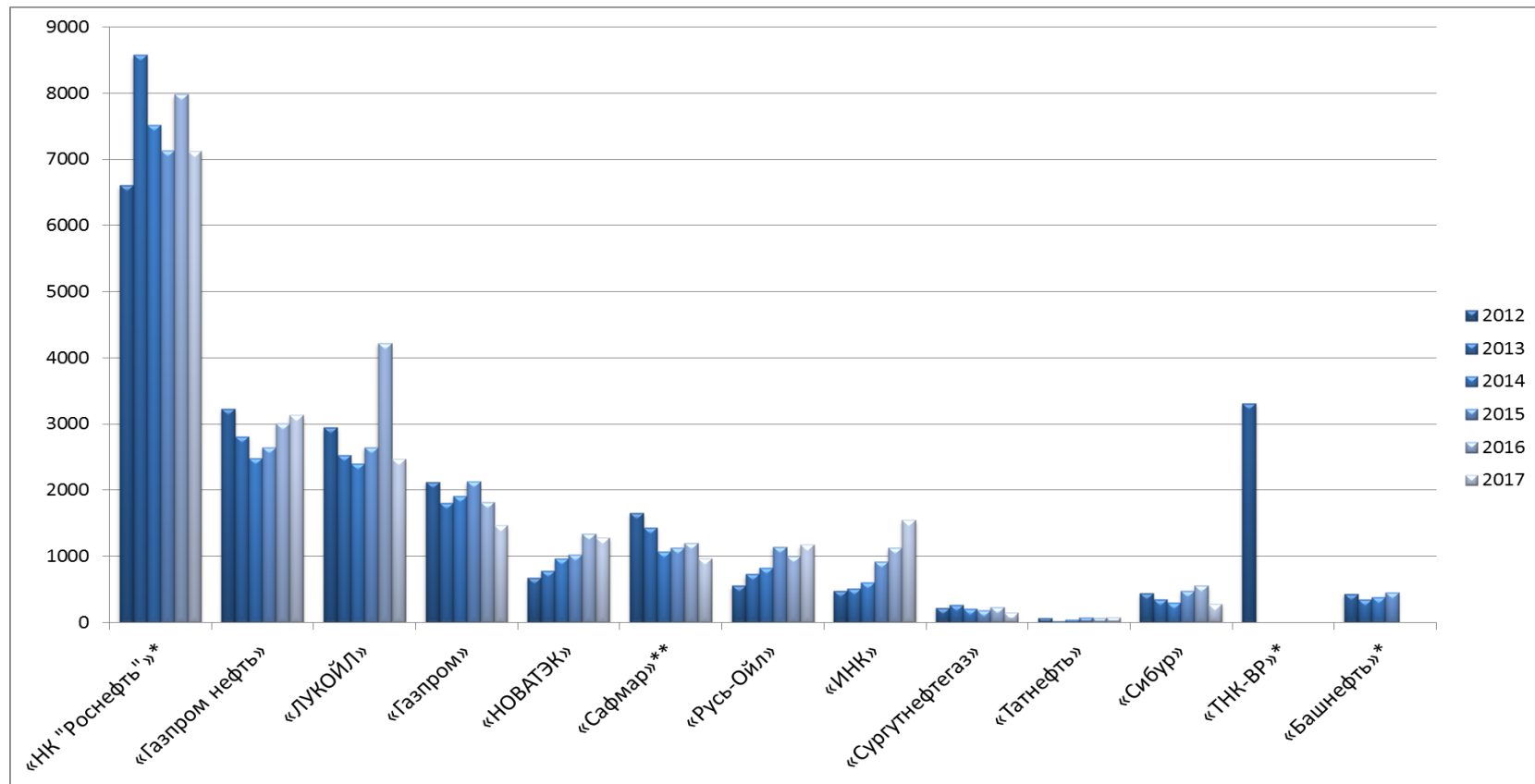
### Суммарная доля регионов РФ в сжигании газа за период наблюдения:





## Результаты

### Крупнейшие компании по сжиганию ПНГ (в млн. м<sup>3</sup>):

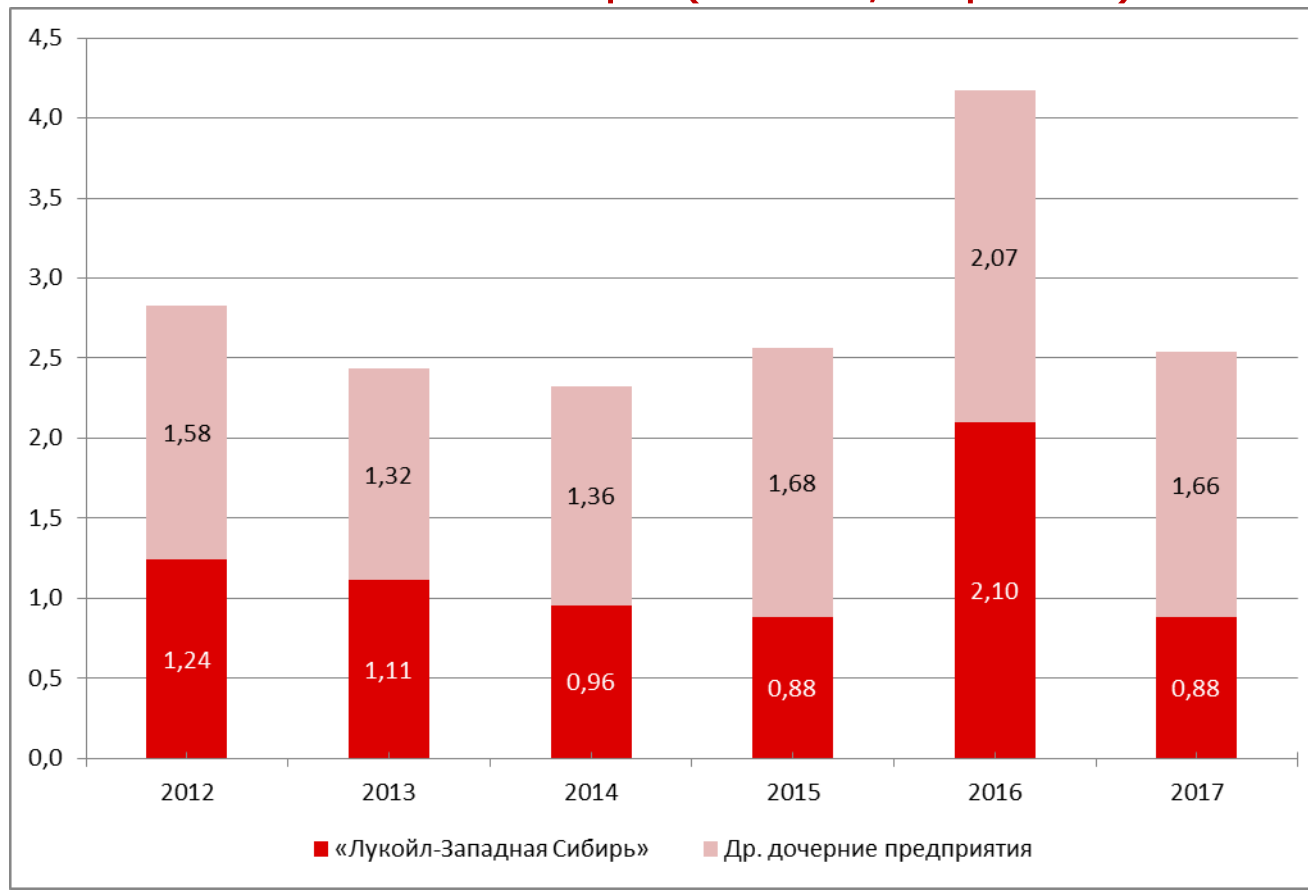


\* — данные по «НК "Роснефть"» приведены с учётом приобретений «ТНК-ВР» (с 2013 г.) и «АНК "Башнефть"» (с 2016 г.);

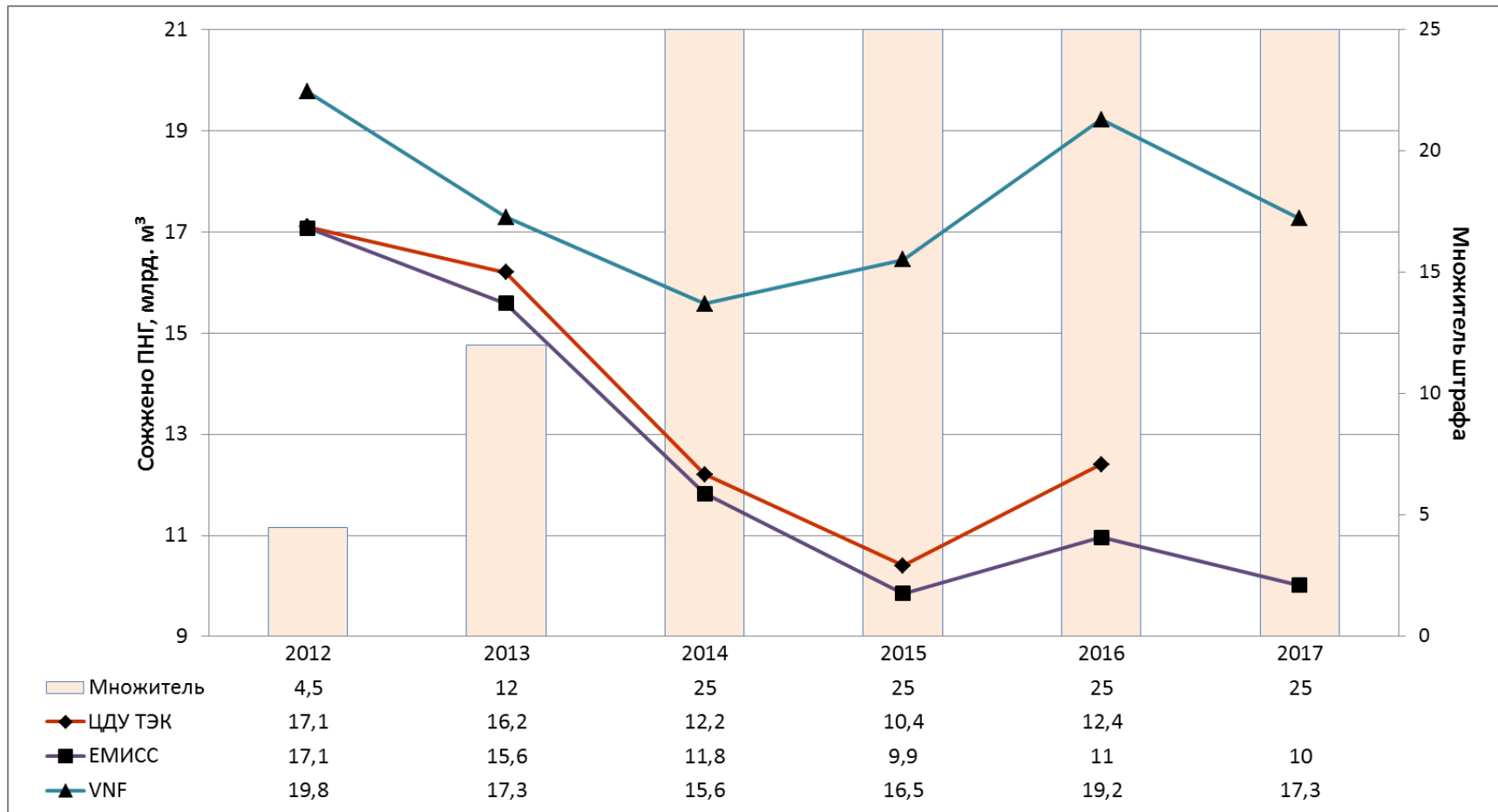
\*\* — в составе группы «Сафмар» учтены выбросы компаний «НК "РуссНефть"», «Нефтиса» и «Сладковско-Заречное».

## Результаты

### Авария на Локосовском ГПЗ (ХМАО — Югра) и рост выбросов «ЛУКОЙЛа» в Западной Сибири (2016 г., млрд. м<sup>3</sup>):



## Результаты: сравнение с официальной статистикой



Данные VIIRS Nightfire (VNF) даны только по нефтяным месторождениям. Гистограммой показан множитель штрафа за сверхлимитное сжигание ПНГ.

## Результаты: экономические и экологические потери от сжигания ПНГ

### Ожидаемые потери от сжигания ПНГ в России (в ценах 2012–2017 гг.):\*

- В стоимости возможной продукции: от 30–40 млрд. руб. (прямая продажа газа) до 300–320 млрд. руб. (глубокая переработка);
- Электрогенерация (в расчёте на крупные ГРЭС): 67 500–80 000 ГВт × ч ( $\approx$  потребление России в июле), или 45–53 млрд. руб. (в ценах 2017 г.);
- Поступления в бюджет за счёт штрафов за сверхлимитное сжигание: 2–5 млрд. руб./год;
- Эмиссия CO<sub>2</sub>-эквивалента: 36–45 млн. т/год\*\*, или 1,5% от сокращения выбросов согласно Парижскому соглашению.

\* Используются данные Росстата, «Сибура», «Интер РАО» и администрации ХМАО — Югры.

\*\* ПНГ приравнен к метану, сожжённому максимально эффективно.

## Выводы:

- 80–85% зафиксированного сжигания приходится на нефтяные месторождения.
- Роль традиционных регионов (Европейская часть России, ХМАО) в сжигании ПНГ снижается, заметно растут выбросы в регионах нового освоения;
- Сжигание на некоторых месторождениях заметно снижается, на смену приходят факелы выходящих в промышленную эксплуатацию крупных месторождений ЯНАО, Томской и Иркутской обл. без инфраструктуры для полноценной утилизации ПНГ, достраивающейся позднее.
- Общего тренда по компаниям не существует, уровни сжигания зависят от конкретики: географии деятельности, роста добычи нефти, аварийных событий.
- Уровни сжигания ПНГ в России за 2012–2017 гг. держатся на уровне 17–18 млрд. м<sup>3</sup>/год. Ср. с данными Росстата и «ЦДУ ТЭК»: падение с 17 до 11–12 млрд. м<sup>3</sup>/год.
- Сжигание ПНГ приводит к:
  - потере десятков и первых сотен млрд. руб. в стоимости продукции;
  - 1,5% выбросов CO<sub>2</sub>, которые Россия обязалась сократить согласно Парижскому соглашению.

## Литература: данная работа

- 1) Elvidge, C. D., Zhizhin, M., Hsu, F.-C., Baugh, K. E. VIIRS Nightfire: Satellite Pyrometry at Night // Remote Sensing. Vol. 5. 2013. Pp. 4423–4449.
- 2) 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. Vol. 9. 2016. Pp. 1–15.
- 3) Elvidge, C. D., Zhizhin, M., Baugh, K. E., Hsu, F.-C., Ghosh, T. Extending nighttime combustion source detection limits with short wavelength VIIRS data // Remote Sensing. *Подана на рецензию 10.2018.*
- 4) Жижин М.Н., Элвидж К., Пойда А.А. Мультиспектральное дистанционное зондирование ночной поверхности Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14. 2017. №3. С. 9–26.
- 5) Матвеев А.М., Жижин М.Н., Пойда А.А. Спутниковый мониторинг сжигания попутного нефтяного газа в России // Экономическая политика. *Подана на рецензию 23.10.2018.*
- 6) Месторождения и лицензии. URL: <https://openmap.mineral.ru/Standard/?l=ru#>.
- 7) Комплексный анализ фондовой информации «Росгеолфонда». URL: <http://www.rfgf.ru/bal/a/>.

## Литература: другие источники

- 1) Anejionu, O.C.D.; Blackburn, G.A.; Whyatt, J.D. Detecting gas flares and estimating flaring volumes at individual flow stations using MODIS data // Remote Sensing of Environment. Vol. 158. 2015. Pp. 81–94.
- 2) Casadio, S., Arino, O., Serpe, D. (2012). Gas flaring monitoring from space using the ATSR instrument series // Remote Sensing of Environment. 116. 2012. Pp. 239–249.
- 3) Caseiro, A., Rücker, G., Tiemann, J., Leimbach, D., Lorenz, E., Frauenberger, O., Kaiser, J. W. Persistent Hot Spot Detection and Characterisation Using SLSTR // Remote Sensing. Vol. 10. Issue 7. 2018. 28 p.
- 4) Faruolo, M., Lacava, R., Pergola, N., Tramutoli, V. On the Potential of the RST-FLARE Algorithm for Gas Flaring Characterization from Space // Sensors. 18. 2018. 21 p.
- 5) Franklin, M., Chau, K., Cushing, L. J., Johnston, J. E. Characterizing Flaring from Unconventional Oil and Gas Operations in South Texas Using Satellite Observations // Environmental Science & Technology. *Подана на рецензию 22.09.2018.*
- 6) Hodgson, R. Dissertation "Generating a scalable calibration equation that can be applied to VIIRS Nightfire (VNF) radiant heat calculations to estimate gas flaring volumes in Nigeria." 2018.
- 7) Zhang, X., Scheiving, B., Shoghli, B., Zygarlicke, C., Wocken, C. Quantifying Gas Flaring CH<sub>4</sub> Consumption Using VIIRS // Remote Sensing of Environment. 7. 9529–9541. 2015.
- 8) Алсынбаев, К.С., Брыксин, В.М., Евтюшкин, А.В., Ерохин, Г.Н., Козлов, А.В. Оценка мощности факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа на основе обработки космоснимков MODIS // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. №10. С. 131–137. 2013.

A large industrial facility, possibly a refinery or chemical plant, is shown at night. The scene is dominated by a massive, bright fire or explosion in the sky, which illuminates the surrounding structures. The fire is a large, irregular shape with a bright yellow and orange core, transitioning to a darker orange and red at the edges. The industrial structures below are silhouetted against the dark night sky, with some lights visible. The overall atmosphere is one of a major industrial incident.

# Спасибо за внимание

Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки России (Государственный контракт 14.607.21.0165, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI60716X0165).