Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

Матвеев А.М., Андреев А.В., Жижин М.Н., Пойда А.А., Трусов А.В.

Спутниковый мониторинг факелов сжигания попутного нефтяного газа на территории России

Москва 2019

Аннотация. Сжигание попутного нефтяного газа (ПНГ) является экономически и экологически нерациональным способом его утилизации. Доступность данных по сжиганию ПНГ меняется в зависимости от страны; часто статистика ограничена или нерелевантна. На сегодняшний день спутниковый мониторинг является единственным инструментальным методом измерения объёмов сжигания газа, не связанным с деятельностью нефтегазовых компаний. Однако разработка методики мониторинга сталкивается с необходимостью обработки больших массивов данных и введения алгоритма оценки объёмов сожжённого газа.

В данной работе описан алгоритм, разработанный для сенсора VIIRS, и приведён анализ полученных данных по территории России за период наблюдений.

Матвеев А.М. младший научный сотрудник международной лаборатории математических методов исследования социальных сетей ИПЭИ Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Андреев А.В. инженер международной лаборатории математических методов исследования социальных сетей ИПЭИ Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Жижин М.Н. ведущий научный сотрудник международной лаборатории математических методов исследования социальных сетей ИПЭИ Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Пойда А.А. старший научный сотрудник международной лаборатории математических методов исследования социальных сетей ИПЭИ Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Трусов А.В. заведующий международной лабораторией математических методов исследования социальных сетей ИПЭИ Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Данная работа подготовлена на основе материалов научно-исследовательской работы, выполненной в соответствии с Государственным заданием РАНХиГС при Президенте Российской Федерации на 2018 год.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	5
2. МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА СЖИГАНИЯ ПНГ. МЕТОД VIIR	5
NIGHTFIRE	7
2.1 Meтoд VIIRS Nightfire	7
2.2 Программная реализация алгоритма VNF	17
2.3 Уточнение данных VIIRS Nightfire на территории России	21
2.4 Проблемы методики и перспективы	24
3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ	31
3.1 Результаты на основе каталога факелов сжигания ПНГ в России	31
3.2 Сравнение с официальной статистикой	40
3.3 Возможные потери от сжигания ПНГ	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
ЛИТЕРАТУРА	52
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 — Структура базы данных «горячих точек» VIIR	S
Nightfire	58

ВВЕДЕНИЕ

Попутный нефтяной газ (ПНГ) является неизбежным продуктом нефтедобычи. Одним из популярных, но нерациональных в экологическом и экономическом плане способов утилизации ПНГ является сжигание на газовом факеле. По данным спутникового мониторинга, с 1994 года в мире ежегодно сжигается более 140 млрд. м³ ПНГ¹Ошибка! Источник ссылки не найден., что сопоставимо с 3,5% от объёмов ежегодной мировой добычи природного газа (Книжников, Ильин, 2017).

В России с 2009 года целевым показателем по утилизации ПНГ (использования газа не для сжигания) на государственном уровне является 95%; с 2012 года введены ужесточённые штрафные санкции за сжигание ресурса сверх установленной планки (см. подробней: (Кирюшин и др., 2013)).

¹ Zero Routing Flaring. The World Bank. URL: <u>http://www.worldbank.org/en/programs/zero-routine-flaring-by-2030</u> (дата обращения: 13.05.2018).

Для решения проблемы необходим контроль над уровнями сжигания ПНГ. В России до недавнего времени (начало 2010-ых гг.) на многих месторождениях расчёт расхода сжигаемого ПНГ осуществлялся косвенными методами (по газовому фактору или согласно «Методике расчёта выбросов вредных веществ в атмосферу при сжигании попутного нефтяного газа на (Методика..., 1998)); большинство факельных установках» сегодня месторождений оснащены специальным оборудованием (расходомерами) для измерения уровней сжигания ПНГ² (Книжников, Ильин, 2017). Однако, вопервых, существуют присущие расходомерам проблемы, ведущие к повышению возможной ошибки измерений (приводятся данные по ошибке от 8-14% (Руденко, 2014) (экспериментальные данные) до 20-30% (Кирюшин и др., 2013) при допустимом ГОСТом³ отклонении в $\pm 5\%$), во-вторых, как подчёркивает WWF, существуют проблемы релевантности официальной статистики конкретно по России (Книжников, Ильин, 2017). Дополнительной сложностью в сопоставлении данных является то, что отчётность компаний по утилизации ПНГ на конкретных месторождениях является коммерческой тайной (Нижегородов, 2017). Поэтому по-прежнему существует запрос на данные сторонних методов фиксации объёмов сжигания ПНГ, и одним из инструментальных решений поставленной задачи является спутниковая съёмка.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Задача данного раздела — рассмотрение алгоритма спутникового мониторинга объёмов сжигания попутного нефтяного газа VIIRS Nightfire (VNF) и уточнение данных по регионам и компаниям России.

² Согласно докладу WWF за 2017 год, в России доля месторождений с необходимым оборудованием приближается к 100%. Ср.: 10 лет назад она составляла 50% по стране (Книжников, Ильин, 2017).

³ ГОСТ Р 8.733–2011: Системы измерений количества и параметров свободного нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования (с Изменением №1) (ГОСТ Р 8.733–2011).

Впервые газовые факелы как объект исследования для дистанционного зондирования были выделены в конце 1970-ых гг. (Li et al., 2000). Длительное время уровень развития техники и закрытость данных не позволяли исследованиям приводить оценки возможных объёмов сжигания газа ПНГ. Исследователи также сталкивались с другими проблемами: необходимостью обработки больших массивов данных, выделения факелов на фоне других «горячих точек», выбора корректной спутниковой платформы, корреляции энергии излучения факелов с данным других источников.

Рассекречивание баз данных по серии спутников DMSP-OLS с 1992 г. позволили в работах (Elvidge et al., 2007; Elvidge et al., 2009) провести оценку уровней глобального сжигания попутного газа на основании данных по светимости факелов и их корреляции с цифрами Всемирного банка. Будучи первой попыткой по глобальной оценке объёмов сжигания ПНГ, в работе допускалась высокая вероятная ошибка.

Вслед за данной работой различными авторскими коллективами были проведены исследования в направлениях глобального детектирования газовых факелов (для сенсора ATSR (Casadio et al., 2012)) и оценок объёмов сжигаевомго газа на региональном уровне (по данным MODIS (Anejionu et al., 2015; Faruolo et al., 2018); VIIRS (Zhang et al., 2015; Hodgson, 2018); SLSTR (Caseiro et al., 2018)); однако работ по глобальной оценке уровням сжигания ПНГ не проводилось. В России авторским коллективом Балтийского университета проводились работы по оценке объёмов сжигания ПНГ в XMAO — Югре с помощью сенсоров MODIS (Алсынбаев и др., 2013). В исследовании была произведена оценка сжигания ПНГ на основании корреляции данных спутниковой съёмки с известными объёмами сжигания на конкретных факельных установках. Другим авторским коллективом опубликовано исследование на основании снимков Landsat с поиском корреляции количества факельных установок и объёмов сжигания в этом же регионе (Кочергин и др., 2017). Следует отметить, что оба исследования

6

сосредоточены на XMAO, тогда как зарубежные исследования регионального масштаба не затрагивают Россию.

В настоящей работе представлено краткое изложение метода VIIRS Nightfire (VNF). Методика, применяемая в данной работе, подробнее описана в работах (Elvidge et al., 2013a; Elvidge et al., 2016) (англ. версия) и (Жижин и др., 2017) (краткий перевод). Описание методики для поиска газовых факелов представлено в источнике (Elvidge et al., 2016**Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

2. МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА СЖИГАНИЯ ПНГ. МЕТОД VIRS NIGHTFIRE

2.1 Meтoд VIIRS Nightfire

Nightfire представляет собой алгоритм для поиска «горячих точек» на поверхности Земли, опирающийся на детекцию сигнала источника в ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазоне. Детектирование газовых факелов является одним из направлений использования алгоритма VNF. Факелы характеризуются как точечные, горячие⁴ и относительно стабильные источники теплового ИК излучения на поверхности Земли. Это позволяет отделить «горячих точек»: индустриальных объектов ИХ OT иных (металлургия, производство цемента, теплоэлектростанции) и природных явлений (вулканы, лесные пожары) с высокой долей уверенности. Лишь немногие объекты способны соответствовать требуемым характеристикам: крупные электрические источники света, устойчивые пожары, коксохимические заводы. Гистограмма распределения «горячих точек» по температурным группам представлена на рисунке 2.1.

⁴ При разработке метода VNF средняя температура сжигаемого ПНГ была определена как 1720 ± 61 K (Elvidge et al., 2013a). В других исследованиях приводятся цифры 1150 K (Anejonu et al., 2015) и 1450 K (Faruolo et al., 2018).



Рисунок 2.1 — Гистограмма распределения температуры источников горения на поверхности Земли за одну ночь (земные сутки) согласно VNF.
Вертикальная ось – число детекций, горизонтальная ось – температура в К Примечание — Источник: (Elvidge et al., 2016).

Для распознавания тепловых детекций на ночной поверхности Земли алгоритм VIIRS Nightfire использует диапазон инфракрасного излучения в пределах от ближнего (0,85 мкм) до дальнего (12,5 мкм) ИК девяти работающих ночью каналов VIIRS. В ходе наблюдений было выявлено, что в ночное время тепловые источники выделяются в коротком ИК диапазоне с максимальным отношением «сигнал-шум». Днём сигнал «горячих точек» в этом диапазоне «зашумлён» солнечным светом, из-за чего на изображениях со средним разрешением $\sim 0.75 \times 0.75$ км они не распознаются (Elvidge et al., 2013b). Поэтому с момента публикации метода (Dozier, 1981)(Elvidge et al., 2013a), небольшими изменениями В большинстве используемого с алгоритмов поиска тепловых субпиксельных⁵ источников с помощью ДЗЗ (Elvidge et al., 2016), «горячие точки» на поверхности Земли вне зависимости

⁵ Субпиксельный тепловой источник занимает многим меньше пикселя спутникового снимка, поэтому его сигнал фиксируется не полностью.

от времени суток ищутся в среднем и дальнем ИК диапазоне (MWIR и LWIR). При этом на этих длинах волн заметен «шум» от фона и облаков, что затрудняет фиксацию и измерение параметров источников.

В общем приближении измерение характеристик горячего источника на поверхности Земли алгоритмом VNF производится по закону Планка для абсолютно чёрного тела (Elvidge et al., 2013a):

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

где B_{λ} — спектральная плотность излучения с поверхности абсолютно чёрного тела для данной длины волны; λ — длина волны; T — температура (К); k_B — постоянная Больцмана; h — постоянная Планка; c — скорость света.

На основе формулы Планка выводится закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{A}{T},\tag{2}$$

где λ_{max} — длина волны с максимальным излучением (*R*); *A* — постоянная Вина; *T* — температура абсолютно чёрного тела.

По (2), газовые факелы, как более горячие источники, будут иметь максимальную светимость в более коротких диапазонах сенсоров. Для VIIRS было выявлено, что максимальное излучение факелов приходится на ИКдиапазон M10 сенсора с длиной волны $\lambda = 1,6$ мкм (Elvidge et al., 2013а). Это отличает метод VNF от использованных ранее методик, которые делали упор на средневолновый ИК-спектр ($\lambda = 4$ мкм), что, благодаря меньшему зашумлению данного диапазона на фоне среднего ИК, применяемого для детектирования пожаров и в некоторых других алгоритмах детекции факелов, позволяет получать более точные данные (Жижин и др., 2014).

Излучение по каждой зафиксированной детекции (шестикратное превышение шума в канале M10 и температуры в 1 300 К (Elvidge et al., 2013а)) записываются во всех диапазонах сенсора, и по (1) автоматически моделируется кривая Планка для данного источника. Поскольку площадь источника *S* (<0,001 км²) многим меньше площади пикселя *S_p* (~1 км²), сенсор фиксирует сигнал «серого» тела, который масштабируется множителем ε излучательной способностью источника. Благодаря моделированию кривой Планка по данным излучения с нескольких ИК-спектров, спутник за пролёт способен зафиксировать температуру T и площадь источника S, которая равна $S = \varepsilon \times S_p$. Температура *T* и коэффициент ε находятся приближением с помощью двунаправленной регрессии зафиксированных сигналов в ИК диапазоне к форме кривой Планка; є по своим свойствам (є < 1) вызывает смещение кривой вниз и является линейным значением, тогда как изменение температуры нелинейно. Отношение наблюдаемого спектра К гипнотическому спектру тела с подобной температурой, занимающего весь пиксель, позволяет определить є источника и, следовательно, его площадь. Таким образом, после моделирования кривой Планка извлекаются температура и площадь «фигуры» фиксируемого факела.

В зависимости от полноты фиксации излучения в различных диапазонах ИК-спектра возможно три варианта моделирования кривой Планка:

1) При удачной детекции в среднем ИК-диапазоне возможно моделирование кривой Планка для фона при учёте данных дальнего ИКспектра; соответственно, итоговая кривая строится на основании сигнала факела и фона, позволяя точнее определить характеристики первого;

2) В случае наличия детекций только в SWIR-диапазоне спектра возможно моделирование кривой только для факела, поскольку в ближнем ИК излучение фона не фиксируется;

3) В случае детекции только в одном канале (наиболее вероятны М10 и М11) используются либо средние данные за год для данного объекта (факела), либо, при их отсутствии. температура источника принимается за 1810 К (температура горения метана) (Elvidge et al., 2016).

Полная энергия излучения источника вычисляется по закону Стефана — Больцмана:

$$RH = \sigma T^4 S, \tag{3}$$

где *RH* — суммарное излучение (радиация) объекта (мВт); *о* — постоянная Стефана — Больцмана; *T* — абсолютная температура объекта (К), *S* — его площадь (м²).

Используемые уточнения данных. Для получаемых данных используется стандартная для VIIRS маска облаков. Однако было отмечено, что иногда факелы помечаются ей как облака. Для исключения данной ошибки маска облаков не применяется для пискелей, в которых зафиксирована детекция в канале M10 (Elvidge et al., 2013).

Сенсор в некоторых случаях фиксирует детекции в районе магнитных аномалий (пояса полярных сияний и Бразильская магнитная аномалия). В случае отсутствия подтверждения аномально высокого излучения одного канала в других каналах сенсора детекция исключается [Zhizhin et al., 2013].

В ходе анализа временных рядов отдельных факелов в различных атмосферных условиях было установлено, что применение атмосферной оказывает незначительное влияние на наблюдения [Elvidge et al., 2016]. Поэтому на сегодняшний день атмосферная коррекция для уменьшения числа возможных источников ошибки не применяется, однако рассматривается возможность её учёта.

Было установлено, что фиксируемая площадь факела и его энергия излучения зависят от угла наблюдений спутника (относительно факела). Форму факела можно принять близкой к эллипсоиду (но не равной ему) —

11

это видно на основании анализа снимков факелов и, вероятно, связано с направленностью выброса сжигаемой смеси и «плавучестью» горячего газа в атмосфере (Elvidge et al, 2016).

$$S = b^2 \sqrt{\frac{1 + \rho^2 + (1 - \rho^2) \times \cos(2\theta)}{2}},$$
(4)

где *ρ*=*a* ∕ *b* — отношение сторон эллипсоида; *θ* — угол наблюдения спутника относительно «тела» факела.

Стороны эллипса (наблюдаемая фигура для съёмки двухмерна) факела определяются при помощи нелинейной регрессии результатов формулы (4) для различных углов наблюдения спутника (пример представлен на рисунке 2.2). В случае недостаточного числа наблюдений соотношение сторон принимается равным вычисленному среднему для других факелов (1,6) (Elvidge et al., 2016).



Рисунок 2.2 — График зависимости фиксируемой энергии излучения RH в зависимости от угла наблюдения спутника по отношению к наблюдаемому факелу

Примечание — Источник: (Elvidge et al., 2016).

Следует отметить, что это уточнение актуально только для широко распространённых вертикальных факельных установок; площадь факела горизонтальных установок не зависит от угла наблюдения.

В ходе агрегирования базы данных было отмечено, что оценки параметров крупнейших факелов дают неправдоподобные результаты их энергии излучения. Это было связано с нелинейностью зависимости свечения от объёмов сжигания ПНГ. Для учёта этого фактора формула (3) преобразуется в:

$$RH' = \sigma T^4 S^D, \tag{5}$$

где *D* — множитель для коррекции суммарной энергии излучения факела с увеличением его мощности, равный 0,7 (Elvidge et al., 2016).

Агрегирование базы данных. За доступное время наблюдений (март 2012 — 2017 гг.) результаты работы метода VNF ежедневно записывались в базу данных. Длительность наблюдений позволяет усреднить энергию излучения, уточнить координаты источника (ср. точность ~50 м при площади пикселя ~750×750) и нивелировать некоторые из проблем спутникового мониторинга (вроде различного режима горения факела по времени, появления новых и погашения старых факелов).

Метод выделения отдельного факела состоит в том, что на карте отображаются все детекции (>1 300 К) VNF за заданный период (в данном случае год). Методом "water-shed" проводятся контуры вокруг кластеров детекций (предполагаемого единичного факела) (Elvidge et al., 2016). При каждом пролёте спутника выбирается самый яркий пиксель; данные также собираются в безоблачных условиях при отсутствии детекций в указанном пикселе. После наблюдения в течение года накапливается временной ряд с записью значений RH. На основании собранных данных возможно найти значение энергии излучения факела. Полагаем средние его пропорциональным объёмам сжигания ПНГ, возможно нелинейным.

13

Энергия излучения факелов суммировалась по странам в рамках векторных карт их политических границ. Первоначальная калибровка данных проводилась с имеющимися данными по отдельным месторождениям в Нигерии, Северной Дакоте и Техасе (Elvidge et al., 2016). Затем зафиксированные данные по суммарному свечению в рамках страны соотносились с отчётностями компании CEDIGAZ по 47 странам⁶.

Для расчёта зависимости объёмов сжигания ПНГ от энергии излучения факела была применена формула (6):

$$V = RH' \times Slope, \tag{6}$$

где *Slope* — коэффициент пропорциональности наклона прямой регрессии при соотнесении с отчётностями CEDIGAZ был вычислен как 0,0298 (Elvidge et al., 2016). Используемая линейная регрессия через начало координат имеет высокую степень детерминации ($R^2 = 0,904$). С помощью регрессии через начало координат (regression through the origin) суммарная энергия излучения по странам калибруется по данным CEDIGAZ и впоследствии распределяется по конкретным факелам сообразно их энергии излучения. 95%-ный предсказательный интервал для оценок на основании калибровки с данными CEDIGAZ составляет $\pm 3-3,5$ млрд. м³, что в случае России означает возможную ошибку $\pm 15\%$.

Необходимо отметить, что CEDIGAZ приводит данные только по нефтяным месторождениям, не учитывая газовые месторождения и объекты переработки. Для этого в рамках России авторами метода было проведено разбиение месторождений на нефтяные и газовые и были добавлены известные объекты переработки. После калибровки были учтены результаты по всем типам объектов.

⁶ National Flared Gas Volumes. CEDIGAZ. URL: <u>http://www.CEDIGAZ.org/products/natural-gas-database.aspx</u> (дата обращения: 13.05.2018).

Данные, полученные с помощью алгоритма VNF для газовых факелов, публикуются на официальном сайте NOAA⁷.

Экспериментальная верификация методики. Экспериментальная верификация алгоритма VNF для газового факела в настоящее время проводится на тестовой установке с контролируемым расходом сжигаемой смеси. Ниже приведены предварительные результаты первой серии экспериментов.

На рисунке 2.3 представлено сравнение интенсивности излучения факела, полученных с помощью моделирования кривой Планка согласно VNF (красная кривая) и по данным наблюдения с наземного спектрометра (чёрная кривая) в одинаковый момент времени.



Рисунок 2.3 — Корреляция интенсивности излучения, фиксируемой наземным спектрометром (чёрная кривая) и алгоритмом VNF (красная кривая)

Видно, что в окнах наблюдения спутника данные источников имеют лишь незначительное расхождение. Расхождения в остальных диапазонах

⁷ <u>https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_global_flare.html.</u>

спектра связаны с непрозрачностью атмосферы с земли (преимущественно в роли «шума» выступает водяной пар) и возможные артефакты прибора. Данные наземного спектрометра доступны для излучения с длиной волны менее 2,5 мкм.

На рисунке 2.4 представлено сравнение данных энергии излучения, зафиксированной согласно VNF (формула (5)), и массового расхода смеси, зафиксированного расходомером на объекте. В эксперименте учитывается геометрия съёмки (угол наклона спутника относительно факела).



Массовый расход vs RH'

Рисунок 2.4 — Корреляция энергии излучения согласно VNF и массового расхода смеси согласно расходомеры на тестовой установке в синхронный момент времени

На графике видна заметная линейная корреляция двух измеряемых параметров, что говорит о наличии сильной корреляции энергии излучения факела с объёмами сжигания газа на факельной установке. Это подтверждает тезис о возможности использования данных алгоритмов ДЗЗ для оценок сжигания ПНГ.

2.2 Программная реализация алгоритма VNF

Настоящий раздел написан на основе авторского свидетельства (РАНХиГС, 2018).

Входными Nightfire для алгоритма ланными является мультиспектральный набор изображений, полученных с радиометра VIIRS, установленного на спутниках семейства JPSS. Минимальный набор состоит из изображения в ИК-канале M10 (формат HDF5, стандартный префикс в имени файла SVM10*) и дополняющего растра с географической привязкой пикселей изображений (формат HDF5, стандартный префикс в имени файла GMTCO*). Максимальный набор входных файлов включает изображения в видимом канале DNB и дополняющего растра с географической привязкой, девяти изображений в ИК-каналах M7, M8, M10, M11, M12, M13, M14, M15, М16 и дополняющего растра с географической привязкой пикселей изображений, а также маска облачного покрова (стандартный префикс в имени файла IICMO*). Суммарно используется до 14 наборов данных на сцену.

Процесс обработки мультиспектральных инфракрасных изображений разделён на два шага: детектирование и оценка параметров источников горения. Последовательная версия алгоритма реализована в среде MATLAB. Схема программной реализации VNF представлен на рисунке 2.3.

VIIRS Nightfire (VNF) Near-Real Time (NRT) Processing at NCEI-CO



Рисунок 2.5 — Алгоритм реализации методики VNF

Первый шаг, детектирование, реализован в программе VIIRS_detect, на вход которой подаётся набор изображений и данных геопривязки, а на выходе получается таблица детекций, т.е. пикселей, в которых ИК-сигнал

локально превышает уровень шума. Выходная таблица в формате CSV содержит информацию о времени, координатах, яркости в ИК-каналах для обнаруженных источников горения. Полная структура базы данных представлена в Приложении 1.

На втором шаге в программе VIIRS_fit значения яркостей в ИК-каналах для источников горения из таблицы детекций с помощью нелинейной регрессии приближаются суммой спектральных кривых (в предположении абсолютно чёрного тела) для субпиксельного источника горения на «холодном» фоне поверхности земли или облаков. В результате работы программы VIIRS_fit CSV-таблица детекций дополняется их параметрами, такими как температура, площадь, мощность излучения. На выходе программы получаются расширенная таблица обнаруженных источников горения с координатами, яркостями и оценками параметров в формате CSV, а также векторная карта их расположения, спектров и параметров в формате KML.

Результаты работы алгоритма ежедневно публикуются на сайте NOAA⁸.

Для выделения газовых факелов используется дополнительная обработка. Всего используется три базы данных:

• БД всех детекций;

• БД с контурами факелов, выделенными с помощью алгоритма "watershed", и статусами облачности;

• БД с центрами факелов.

1) Применяется температурный порог (1300 К) для первой БД. Если детекция проходит порог, она считается факелом, и данная температура заносится в базу; если Т не проходит барьер — она не добавляется в БД. В случае наличия в БД контуров факелов и облачности данных с превышением температурного порога в предыдущие дни этого года низкая температура записывается (она считается температурой к температуре только одного,

⁸ https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_viirs_fire.html.

низкотемпературного факела, иногда работающего в связке с высокотемпературным). Температура источника, зафиксированного только в одном канале, приравнивается к 1810 К.

2) Вычисляется гипотетическая яркость в канале М10 для данного факела, как если бы он занимал полный пиксель сенсора; по ней вычисляется множитель *ε*, на основании которого находится площадь факела.

 Производится поиск дубликатов: используются только данные пикселя с максимальным откликом в М10 или, в случае удачного подсчёта, максимальным RH.

4) Данные заносятся во временной ряд для факела. В нём представлены пролёты спутника, детекции факелов, значения флагов. Возможны сортировка по датам и облачности (для чего необходимы данные второй БД).

5) Для каждого факела вычисляется T_{cp.,} T_{min}, T_{max} и их стандартное отклонение с применением БД только безоблачных детекций. Порог в 1300 К не учитывается (учитываются данные по низкотемпературным факелам).

6) Моделирование кривой Планка может давать ошибку в виде отрицательных площадей; такие ошибки отфильтровываются.

7) Самой яркой детекции присваивается статус географического центра факела (третья БД).

8) Производится учёт геометрии — зависимости угла наблюдения спутника относительно «тела» факела (см. §2.1). Соотношение сторон эллипса факела приравнивается к 1,61 в случае невозможности его аппроксимации.

9) На основании предыдущего пункта производится учёт влияния геометрии на RH (см. рисунок 2.2 в качестве визуального примера).

10) Модифицированные RH для факела суммируются за год. С помощью БД по облакам учитывается процент детекций (количество детекций ÷ количество безоблачных валидных наблюдений).

11) Вычисляется V сжигания на основании формулы (6).

20

2.3 Уточнение данных VIIRS Nightfire на территории России

Зафиксированные VNF факелы были распределены по известным границам субъектов РФ. Далее выполнялся поиск информации по названиям месторождений, их принадлежности (предприятие и материнская компания), типу месторождения и преимущественному ПИ. Месторождения соотносились с картами месторождений и ЛУ ИАЦ «Минерал»⁹ (пример представлен на рисунке 2.6). Объекты транспортировки преимущественно выделялись на основании источников^{10,11,12}.

⁹ Электронная карта недропользования ИАЦ «Минерал». Федеральное агентство по недропользованию — Роснедра. URL: <u>http://www.rosnedra.gov.ru/page/70.html</u> (дата обращения: 13.05.2018). ¹⁰ Каталог нефтеперерабатывающих и газоперерабатывающих заводов (НПЗ/ГПЗ). Объекты LNG

проектов. Energy Base. URL: <u>https://energybase.ru/processing-plant</u>. (дата обращения: 24.05.2018). ¹¹ OpenStreetMap. URL: <u>https://www.openstreetmap.org/</u> (дата обращения: 13.05.2018).

¹² «Викимапия». URL: <u>http://wikimapia.org/</u> (дата обращения: 13.05.2018).



Рисунок 2.6 — Пример электронной карты недропользования ИАЦ «Минерал»

После установления названия месторождения уточнялся тип месторождения и его владелец. В основном для этих целей использовался сайт «Росгеолфонда»¹³, где собраны данные по месторождениям и ЛУ страны. Пример информации представлен в таблице 2.1.

¹³ Комплексный анализ фондовой информации «Росгеолфонда». Российский федеральный геологический фонд «Росгеолфонд». URL: <u>http://www.rfgf.ru/bal/a/</u> (дата обращения: 13.05.2018).

Таблица 2.1 — Пример информации о месторождении на сайте

«Росгеолфонда»

Комплексный анализ фондовой инфо	ормации Росгеолфонда <u>Гость</u>					
информация оо ооъекте учета оа.	ланса					
Объект учета Ямбургское - НГК	Расположение Ямало-Ненецкий автономный округ, в 120 км к СЗ от пос. Тазовский					
Недропользование Лицензия: <u>СЛХ02082НЭ</u> (дата рег-ии 21.05.2008) Недропользователь: ООО "Газпром добыча Ямбург" Разрабатываемые, распределенный фонд недр	Связанные электронные издательские оригинал-макеты государственных балансов полезных ископаемых ГАЗОВ ГОРЮЧИХ, Уральский, Ямало-Ненецкий АО,					
недропользованию по Уральскому ФО Разрабатываемые, нераспределенный фонд недр	ГАЗОВ ГОРЮЧИХ, Уральский, Ямало-Ненецкий АО, 2017					
	<u>ГАЗОВ ГОРЮЧИХ</u> , Уральский, Ямало-Ненецкий АО, 2017 <u>ГАЗОВ ГОРЮЧИХ</u> , Сводные данные по России, 2017 <u>КОНДЕНСАТА</u> , Уральский, Ямало-Ненецкий АО, 2017					
	КОНДЕНСАТА, Сводные данные по России, 2017					

В случае возможной неточности информации пункты помечались жёлтым цветом, текст — курсивом; в случае наличия ошибки поле отмечалось красным. Конкретные особенности подобных факелов подписаны в примечаниях; там же даны возможные варианты названия объекта или комментарии к факелу.

Пример отображения каталога факелов России в Google Earth представлен на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 — Пример отображения зафиксированного алгоритмом VNF факела в Google Earth

2.4 Проблемы методики и перспективы

Поскольку калибровка производится с данными в целом по стране, авторы методики оценивают возможную ошибку метода VNF в 20%, что сопоставимо с упомянутой во введении возможной ошибкой измерительных приборов на месторождениях до 20-30% (Кирюшин и др., 2013). Ошибка по конкретным факелам может быть больше, поскольку данные по объёмам сжигания распределяются сообразно энергии излучения конкретных факелов, вроде состава на которую могут ВЛИЯТЬ местные условия ΠΗΓ, превалирующих метеоусловий, типа факельной установки, эффективности сгорания ПНГ на ней и т. д. С другой стороны, возможная ошибка оказывает минимальное влияние на разницу данных во времени, что позволяет увереннее сравнивать динамику по отдельным месторождениям, регионам, компаниям, а также сопоставлять динамику VNF и официальных источников.

Для полноценной применимости метода VNF вне глобальных рамок необходима калибровка метода не только по отчётностям стран или конкретных штатов, но и верификация на отдельном факельном хозяйстве в режиме «реального времени». В настоящий момент подобная работа проводится на территории США.

Среди других известных проблем следует отметить следующие:

• Использование спутниковой съёмки низкого разрешения не позволяет фиксировать малые факелы. С другой стороны, использование данных более высокого разрешения (например, с Landsat 8) сталкивается со сложностью уменьшения числа наблюдений, что, вкупе с уменьшением повторяемости съёмки в средних и низких широтах и увеличенной частотой облачного покрова, приводит к более грубой оценке и медленнее фиксирует изменения в режиме работы факела.

• Предыдущая проблема приводит к сложности фиксации малых и/или редко горящих факелы и факелов с низкой средней температурой. Низкотемпературные факелы, согласно методике VNF, не способны генерировать значительные объёмы выбросов. Малые факелы (2–5 млн. м³ сжигаемого ПНГ в год), согласно данным Ростехнадзора от 2008 года, составляли до 60% от существовавших на тот момент факелов (1 900 штук), вследствие чего на них могло сжигаться до 2–3 млрд. м³ ПНГ (Кирюшин и др., 2013: стр. 34). Ср.: VNF ежегодно фиксируется 1300–1500 факелов. Поэтому необходимо рассмотреть возможную роль их недооценки, представленную на рисунках 2.8 и 2.9.

25





Следует заметить, что распределение количества факелов в зависимости от объёмов сжигания близко к нормальному, если не учитывать малые факелы, тогда как роль каждой последующей группы возрастает. Для уточнения возможной роли малых факелов необходимо рассмотреть сжигание ПНГ по факелам с различными объёмами сжигания.



Рисунок 2.9 — Гистограмма зависимости суммарных объёмов сжигания ПНГ (Partial Flared Volume) от средней мощности факелов (МСМ) на примере 2017г.

На рисунке 2.9 видно, что доминирующая роль в выбросах в России принадлежит группе факелов со сжиганием 15–150 млн. м³ ПНГ в год. Для метода VNF «слепая зона» детекции факелов начинается в районе 4–5 млн. м³, вследствие чего, полагая количество неучтённых факелов по рисунку 2.8 распределяющимся равномерно, итоговую ошибку следует считать незначительной в рамках России. Дополнительным подтверждением данного тезиса является схождение в доверительном интервале 95% данных VNF по США — стране с максимальным числом малых факелов — с отчётностью по стране.

Эти предположения подтверждаются статистически и экспериментально. В работе (Elvidge et al., 2018b) приводится скаттерограмма зависимости площади источника от его температуры (см. рисунок 2.10). Так, для канала М10 при 1400 К порог детектирования приближается к 1 м², при 2000 К — 0,15 м². Следует, однако, отметить, что до введения в работу канала М11 детекции около этих порогов не позволяли определять характеристики источника в силу отсутствия данных с других спектральных каналов сенсора и невозможности моделирования кривой Планка источника.



Рисунок 2.10 — Пороги чувствительности методики VNF в зависимости от температуры и площади фиксируемого источника для различных ИК-каналов Примечание — Источник: (Elvidge et al., 2018b).

Используя формулу и учитывая преимущественную температуру факелов в 1600–2000 К (5), возможно перевести эти данные в эквивалент годового сжигания ПНГ: он составляет 6,5–7,5 млн. м³ ПНГ / год (с повышением с увеличением температуры), или ок. 20 см³ газа в секунду. Ср.: в ходе эксперимента на тестовой факельной установке факел со сжиганием эквивалента 4 млн. м³ ПНГ в год был зафиксирован VNF только два раза из трёх.

В ходе контролируемого эксперимента на тестовом факельном хозяйстве было установлено, что при сжигании эквивалента 4 млн. м³ ПНГ в год факел фиксируется алгоритмом в половине случаев, тогда как при увеличении объёма подаваемой смеси вдвое позволяет фиксировать факел в каждый пролёт спутника.

Учитывая неравномерный режим работы факелов (например, увеличение сжигания при остановке ГПЗ на профилактику) означает более частую фиксацию факелов и, соответственно, более полный учёт сжигаемых объёмов ПНГ.

• На данном этапе спутниковый мониторинг не способен учитывать состав сжигаемой смеси. Для её решения необходимо знать не только компонентный состав ПНГ, но и пути его утилизации, тип факельной установки, скорость подачи смеси, метеорологические условия. В случае приравнивания ПНГ к метану (как в (Zhang et al., 2015; Hodgson, 2018)) возможная ошибка в определении объёмов составляет от 8 до 37% (Ismail, Umukoro, 2016), увеличивая существующие неточности.

• Упор метода VNF на яркие пиксели не позволяет разбивать выбросы близко расположенных факелов, из-за чего они агрегируются в единую детекцию, учитывающую крупнейший факел. В случае крупных факельных хозяйств это может приводить к значительной недооценке. В работе, описывающей метод Nightfire для сенсора SLSTR спутников серии Sentinel (Caseiro et al., 2018), использована отличная от VNF методика, учитывающая все выделяющиеся на фоне шума пиксели в кластере (а не самый яркий), и отмечено, что детекции по разработанному авторами алгоритму имеют чуть более высокую среднюю температуру (как следствие, энергию излучения и объёмы сжигания после калибровки).

• Спутник снимает показания в среднем дважды за ночь и не может полноценно фиксировать суточные изменения в режиме горения факела,

29

особенно в облачные дни (наблюдения не ведутся при фиксировании облаков). Мы полагаем эту проблему нивелирующейся с агрегацией данных за год (в среднем производится 295–300 наблюдений в средних широтах).

• Летом в северных широтах ночная съёмка затруднена из-за полярного дня, что критично для многих месторождений России, расположенных вблизи или за Полярным кругом. С учётом круглогодичного наблюдения эта проблема не должна приводить к заметному влиянию на получаемый результат. Однако при рассмотрении случая Локосовского ГПЗ (см. п. 3.1, комм. к рисунку 3.4) было отмечено, что профилактические работы на объекте могут проводиться в июне-июле, тогда как спутник способен стабильно фиксировать выбросы только начиная с первой-второй декады июля. В данном случае возможна заметная недооценка выбросов как самого ГПЗ, так и связанных с ним месторождений.

• Спутниковый мониторинг на данном этапе не способен фиксировать рассеивание метана в воздухе — более негативной с точки зрения безопасности и в плане эмиссии вредных веществ практики, альтернативной факельному сжиганию.

Данные VNF по России были сопоставлены с предыдущей версией методики, разработанной для спутников серии DMSP, — методом DMSP Nighttime Lights [Жижин 2014, Elvidge 2009], которые использовались Всемирным банком для мониторинга сжигания ПНГ до 2012 года. При незначительном изменении глобальных данных (на 4 млрд. м³) данные по России оказались завышенными на 10 млрд. м³ (35 млрд. м³ у DMSP против 24,3 млрд. м³ у VNF в 2012 году) [Elvidge 2015а]. Вероятными причинами можно назвать худшее качество данных DMSP, серьёзное расхождение зафиксированного свечения факелов, отчётности по стране и проблему разделения месторождений на нефтяные и газовые.

Заметные сложности вызывает определение преимущественно добываемого компонента на месторождении. Из-за этого осложняется сравнение с иной статистикой, учитывающей только газ, добытый

30

растворённым в нефти. Некоторые факелы могли быть определены неверно. Возможны ошибки с определением итоговой материнской компании, особенно с учётом возможной смены владельца или юридического статуса.

С 2018 года на сенсоре VIIRS введён в ночную эксплуатацию канал M11 ($\lambda = 2,25$ мкм), данные которого возможно использовать для более точного построения кривых Планка и, следовательно, получения более точных данных по температуре объекта и его свечению. В июне 2018 года в эксплуатацию введён сенсор VIIRS на втором спутнике серии JPSS. С прохождением дополнительной верификации метода на конкретных факелах и накоплением более общирных баз данных это позволит постепенно нивелировать существующую вероятность ошибки.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

3.1 Результаты на основе каталога факелов сжигания ПНГ в России

Согласно данным VNF, за 2012–2017 годы, среди стран мира Россия является бессменным лидером по сжиганию ПНГ: на территории страны ежегодно сжигается от 20 до 24,5 млрд. м³ попутного газа (с учётом газовых месторождений и объектов переработки). Сравнение крупнейших стран по сжиганию ПНГ согласно VNF представлено на диаграмме на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 — Крупнейшие страны мира по объёму сжигаемого ПНГ (в млрд. м³) согласно данным VIIRS Nightfire Примечание — Составлено по¹⁴.

Количество факелов и категории детекций. Всего за 2012–2017 гг. на территории России алгоритмом VNF было зафиксировано 2579 факелов, 2414 из которых зафиксированы на месторождениях и 160 — на объектах транспортировки и переработки УВ. Всего зафиксировано 810 активных в плане сжигания ПНГ месторождений и 105 объектов транспортировки и переработки. Неопределёнными осталось 24 объекта, подтверждёнными ошибками алгоритма стали 11 детекций.

Субъекты РФ. Всего факелы зафиксированы в 42 субъектах РФ Объёмы сожжённого на месторождениях ПНГ по самым крупным в этом плане субъектам РФ (>500 млн. м³ хотя бы за один год) представлены на рисунке 3.2.

¹⁴ Global Gas Flaring Observed from Space. Earth Observation Group (EOG), NOAA/NGDC. URL: <u>https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_global_flare.html</u> (дата обращения: 13.05.2018).



Рисунок 3.2 — Субъекты РФ по уровню сжигания ПНГ на месторождениях

До 2016 г. крупнейшим регионом России по сожжённому ПНГ являлся XMAO — Югра¹⁵ (в среднем 5,8 млрд. м³ ПНГ за год), вторым по этому показателю стал Ямало-Ненецкий АО (3,8 млрд. м³); с 2017 г. лидирует ЯНАО.

Заметен постоянный рост в регионах нового освоения, особенно Иркутской области. Он связан с неразвитой инфраструктурой и удалённостью регионов при постоянном увеличении объёмов добычи.

Динамика сжигания ПНГ в субъектах РФ. В ХМАО — регионе с добычей 43–50% нефти России в 2012–2017 гг.¹⁶ — сжигается менее трети от общих объёмов по стране, причём абсолютные значения сжигания и вклад субъекта снижаются, достигнув минимума (20% от выбросов России) в 2017 году. В 2014–2016 гг., однако, объёмы сжигания оставались на одном уровне (причина роста выбросов в 2016 г. представлена на рисунке 3.4) при продолжающемся падении добычи нефти в регионе.

¹⁵ Следует отметить, что, согласно официальной отчётности Департамента ТЭК ХМАО — Югры, в регионе в 2016 году было сожжено 1,6 млрд. м³ ПНГ (ссылка на источник — см. сноску 16).

¹⁶ Итоги деятельности топливно-энергетического комплекса Ханты-Мансийского автономного округа — Югры за 2016 год. Департамент по недропользованию Ханты-Мансийского автономного округа — Югры. URL: <u>https://depnedra.admhmao.ru/upload/iblock/c6f/dlya-sayta-za-12-mesyatsev-2016.docx</u> (дата обращения: 13.05.2018).

Иная ситуация складывается в Ямало-Ненецком АО (4 млрд. м³). До 2014 г. в регионе не вводились крупные месторождения, а на существующих улучшалась утилизация ПНГ. Однако в 2016–2017 гг. введены в промышленную разработку сразу 5 крупных месторождений, ответственные за 2 млрд. м³ выбросов в 2017 г.

Наиболее острая ситуация сложилась в Иркутской области. При добыче 1,9–3,2% нефти России (Ромашкина, 2017) спутниковая съёмка фиксирует 6,5–18% (1,5–3,5 млрд. м³) сжигаемого ПНГ. Наибольший рост приурочен к 2015 и 2017 г., когда увеличивалась пропускная способность трубопровода ВСТО. При этом единственный строящийся объект переработки (Усть-Кутский ГПЗ) будет введён в эксплуатацию в 2022 г.¹⁷

Нефтегазовые компании. Данные по месторождениям крупных нефтеи газодобывающих компаний приведены на рисунке 3.3. Добавлены компании с высокими объёмами сжигания ПНГ. По возможности учтена доля компаний в СП (совместных предприятиях): выбросы распределяются сообразно долевому участию компаний.

¹⁷ Усть-Кутский завод полимеров (УКЗП). Energy Base. URL: <u>https://energybase.ru/processing-plant/ust-kut-polymer-plant-uzpp</u> (дата обращения: 03.08.2018).



Рисунок 3.3 — Объёмы сожжённого на месторождениях ПНГ по компаниям Примечание — «*» отмечены:

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

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

На диаграмме можно выделить следующие аномалии:

1) Первая — резкий рост «Роснефти» в 2013 г., который связан с покупкой «ТНК-ВР».

2) Вторая — заметный рост выбросов «ИНК» и «НОВАТЭК», причина которого связана с ростом добычи на месторождениях новых регионов освоения.

3) Третья аномалия относится к «Лукойлу» в 2016 г.: выбросы компании выросли более чем на 1,5 млрд. м³ (или на 63% от предыдущего года). Диаграмма с выбросами по месторождениям компании представлена на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 — Объёмы ПНГ (в млрд. м³), сожжённого на месторождениях компании «ЛУКОЙЛ»

Основной рост выбросов (1,2 млрд. м³ сожжённого ПНГ) произошёл на дочернем предприятии «Лукойл-Западная Сибирь» — с ним связан весь рост сжигания ПНГ в ХМАО в этом году. При этом, согласно публичной отчётности компании за 2016 год, уровень утилизации ПНГ не изменился (92%), тогда как добыча нефти (следовательно, ПНГ) сократилась на 7,4% (с 100,7 до 93,2 млн. т в 2015–2016 гг.)¹⁸. Падение добычи нефти компанией в ХМАО — Югре составило 8%¹⁹.

Основной причиной сложившейся ситуации стала авария на Локосовском ГПЗ компании в июне 2016 г.²⁰, из-за которой ПНГ, направляемый на переработку, был сожжён на факелах месторождений: VNF зафиксирован резкий всплеск выбросов в июле 2016 г. с последующей

¹⁸ «ЛУКОЙЛ». Годовой отчёт 2015. URL: <u>http://www.lukoil.ru/FileSystem/9/27392.pdf</u> (дата обращения: 13.05.2018);

[«]ЛУКОЙЛ». Годовой отчёт 2016. URL: <u>http://www.lukoil.ru/FileSystem/9/121348.pdf</u> (дата обращения: 13.05.2018).

¹⁹ Итоги..., указ. соч.

²⁰ Четыре человека пострадали в результате пожара на ГПЗ "Лукойла" в XMAO // Информационное агентство России «TACC». 29.06.2016. URL: <u>http://tass.ru/proisshestviya/3415135</u> (дата обращения: 24.05.2018).

нормализацией сжигания к октябрю-декабрю в зависимости от месторождения. После запуска ГПЗ в начале 2017 года выбросы компании в регионе вернулись к состоянию 2015 года.

Отдельные месторождения. Приобское месторождение является крупнейшим по уровню добычи нефти в России: на него приходится 36,5 млн. т (2016 г.) добычи сырья²¹. Оно разделено на два ЛУ: Приобский и Южно-Приобский, принадлежащих соответственно «Роснефти» и «Газпром нефти». Суммарные объёмы сжигания ПНГ на месторождении представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Объёмы сжигания на Приобском месторождении (Приобском и Южно-Приобском ЛУ) в 2012–2017 гг., млн. м³

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Приобское	581	360	205	239	306	219
Южно-Приобское	815	744	579	389	121	159
V, всего	1396	1104	784	628	427	378

Хотя доля добыча нефти по ЛУ распределяется в пропорции 2:1 (Приобский: Южно-Приобский), основные выбросы до 2016 год приурочены к южной части месторождения. В сентябре 2015 г. запущен Южно-Приобский ГПЗ, в результате чего выбросы южного ЛУ упали на 270 млн. м³ в 2016 г. (при этом зафиксированные выбросы на Южно-Приобском ГПЗ составили 24 млн. м³). В 2012 году Приобское и Южно-Приобское месторождения занимали третье и второе места соответственно в топ-10 месторождений России по факельному сжиганию ПНГ. Их роль постепенно снизилась: в 2017 году ни один из ЛУ не входит в топ-10. Интересно отметить, что, согласно данным исследования (Алсынбаев и др., 2013), в 2005 г. только на северном участке месторождения сжигалось более 2 млрд. м³ ПНГ.

²¹ Итоги.... Указ. соч.

Крупнейшим месторождением по сжиганию ПНГ в 2012–2014 гг. являлось Ванкорское месторождение («Роснефть»). Уровни сжигания на нём представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 — Объёмы сжигания на Ванкорском месторождении в 2012– 2017 гг., млн. м³

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017
ID 20585	1026,6	937,3	718,4	89,7	92,1	37,5
ID 20589	465,5	535	380,2	223,2	76	36,1
V, всего	1627	1571	1155	365	292	108
	00		1			

ID 20585 и ID 20589 — отдельные факелы.

Таким образом, в 2012–2014 гг. на единственном факельном хозяйстве ID 20585 сжигалось 700–1000 млн. м³ ПНГ, а в сумме по всему месторождению выбросы составляли 1 150-1 600 млн. м³. В 2016 г. месторождение в целом исчезает из топ-10 крупнейших по объёмам сжигания ПНГ месторождений России; при этом уровень добычи по Ванкорской группе месторождений в 2014–2016 гг. практически не изменился (22 млн. т нефти) (Эдер и др., 2016). Это связано с тем, что в 2014-2015 гг. «Роснефть» построила и запустила газопровод, соединивший месторождение с ГПЗ Западной Сибири, и ввела систему закачки ПНГ в пласт (Эдер и др., 2016). С накоплением БД по годам возможно рассматривать эффект ввода месторождений В промышленную эксплуатацию. Так, нефтяные месторождения Ярудейское («НОВАТЭК») и Новопортовское («Газпром нефть») в ЯНАО, вышедшие на полный уровень разработки в 2016 г., не связаны с трубопроводной системой, и потому неиспользованный ПНГ Уровни $\Pi H \Gamma$ на них сжигается. сжигания представлены в таблице 3.3.

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Ярудейское	3	1	22	158	786	741
Новопортовское	6	71	56	77	436	933
V, всего	9	73	79	235	1222	1674

Таблица 3.3 – Объёмы сжигания на Ярудейском и Новопортовском месторождениях в 2012–2017 гг., млн. м³

В 2017 году на долю названных месторождений приходится 10% от выбросов всех нефтяных месторождений на территории России.

Постоянный рост сжигания ПНГ зафиксирован в Иркутской области. Месторождения области (Ярактинское, Дулисьминское и Верхнечонское) стабильно входят в топ-10 месторождений по сжиганию ПНГ, возглавляя его в 2015–2017 гг. Данные представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 — Объёмы сжигания на крупнейших эксплуатируемых месторождениях Иркутской области в 2012–2017 гг., млн. м³

Молтороницацию	Vounoung	Год						
месторождение	помпания	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Верхнечонское	«НК "Роснефть"»	461	451	498	565	588	668	
Даниловское	«ИНК»	29	30	41	57	89	61	
Дулисьминское	«Русь-Ойл»	519	661	762	1046	862	1087	
Ичёдинское	«ИНК»	0	3	41	106	265	498	
Ярактинское	«ИНК»	450	483	541	800	901	1190	
И	1460	1628	1882	2574	2706	3504		

Резкий рост выбросов в эти годы связан с увеличением пропускной способности трубопровода ВСТО, что приводит к увеличению уровня добычи нефти и ПНГ и, вследствие отсутствия необходимой инфраструктуры, его сжиганию.

В целом за шесть лет работы метода на территории России можно отметить негативную тенденцию в регионах нового освоения: многие крупные месторождения выходят в промышленную эксплуатацию без инфраструктуры для утилизации ПНГ, которая достраивается позднее, вследствие чего сжигаются значительные объёмы газа. Выше представлены примеры Ванкорского, Ярудейского и Новопортовского месторождений и месторождений Иркутской области. Вероятной причиной этого стало послабление в ППРФ №1148, согласно которому выбросы не считаются сверхлимитными в течение первых трёх лет эксплуатации или до достижения 5%-ной выработки месторождения. Как видно на представленных примеров, в случае крупных месторождений это означает сотни миллионов м³ сожжённого газа, приравненного к лимитным.

К месторождениям с сохраняющимися высокими уровнями сжигания ПНГ (>250 млн. м³ в 2017 году) относятся:

• Ханты-Мансийский АО: Тагринское, Приразломное;

• Ямало-Ненецкий АО: Пякяхинское, Южно-Тамбейское (с учётом «Ямал СПГ»), Уренгойское, Ярудейское, Новопортовское;

• Иркутская область: Ичёдинское, Верхнечонское, Дулисьминское, Ярактинское.

3.2 Сравнение с официальной статистикой

Объёмы сжигания ПНГ согласно Росстату определяются средствами измерения, установленными на объектах добычи (Салиева, 2010; ППРФ № 1148, 2012). Данные Росстата доступны через систему ЕМИСС²².Сравнение с оценками VNF по крупнейшим федеральным округам (ФО) — Уральскому и Сибирскому — представлено на рисунке 3.5.

²² Производство основных видов продукции в натуральном выражении с 2010 по 2016 гг. (в соответствии с ОКПД). Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <u>https://fedstat.ru/indicator/40557</u> (дата обращения: 13.05.2018).

Производство основных видов продукции в натуральном выражении с 2017 г. (в соответствии с ОКПД). Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <u>https://fedstat.ru/indicator/58636</u> (дата обращения: 10.08.2018).

Категория «Газ попутный нефтяных месторождений.»



Рисунок 3.5 — Объёмы сжигания ПНГ в Уральском и Сибирском ФО согласно данным Росстата и VNF Примечание — Составлено по²³.

Общее расхождение источников по России составляет (в пользу VNF) 1 700–8 500 млн. м³ ПНГ в зависимости от года, с минимумом в 2013 году и максимумом в 2016 г.

Серьёзные расхождения возникают по конкретным округам. Показатели по традиционным регионам освоения в целом ниже, чем измеренные с помощью VNF, тогда как в новых регионах освоения они выше. В случае с УФО данные Росстата в среднем ниже в 2 раза оценок VNF. Даже если взять за интервал уверенности оценку в 80%, учитывающую возможную ошибку $\pm 20\%$, измеренные таким образом данные всё равно превышают официальные более чем в полтора раза ежегодно. Официальные данные по СКФО у Росстата ниже в 6–8 раз, чем у VNF.

Иная картина наблюдается в СФО: до 2014 г. данные Росстата превышают измеренные VNF в 1,5–2 раза. В 2015–2017 гг. расхождение

²³ См. сноску 23.

данных принимает обратный знак (1 млрд. м³ в пользу VNF). В рассматриваемые годы резко сократились выбросы в Красноярском крае и выросли в Иркутской области.

Данные «ЦДУ ТЭК» используются Минэнерго России в качестве опорных. Они предоставляются по конкретным предприятиям и компаниям, в противоположность региональному подходу Росстата.

Сравнение данных VNF, Росстата и «ЦДУ ТЭК» по объёмам сожжённого ПНГ (в млрд. м³) на нефтяных месторождениях приведено на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 — Сравнение данных по объёмам сжигания ПНГ в России Примечание — Составлено по^{24,25}. Гистограммой представлено изменение множителя платы за сверхлимитное сжигание ПНГ.

²⁴ Материалы конференции «Попутный нефтяной газ 2016». CREON-energy: Нефтегазохимическая консультационная площадка. URL: <u>http://www.creonenergy.ru/consulting/detailConf.php?ID=116791</u> (дата обращения: 13.05.2018).

Материалы конференции «Попутный нефтяной газ 2017». CREON-energy: Нефтегазохимическая консультационная площадка. URL: <u>http://www.creonenergy.ru/consulting/detailConf.php?ID=120034</u> (дата обращения: 13.05.2018).

²⁵ См. сноску 23.

Можно отметить относительную сходимость данных в 2013 году: разница между «ЦДУ ТЭК» и VNF составила 1,1 млрд. м³. Однако с 2014 г. наблюдается прогрессивное расхождение источников: данные «ЦДУ ТЭК» и Росстата в 2016 г. различаются на 1,4 млрд. м³; данные VNF и официальных источников (в среднем) расходятся на 3,5–7,5 млрд. м³ в 2014–2017 гг. В 2015 году спутниковая съёмка зафиксировала рост сжигания, тогда как по данным Росстата и «ЦДУ ТЭК» сжигание снизилось.

На основании приведённых данных возможно построить итоговый график по проценту утилизации ПНГ в России. Согласно ППРФ №1148 (ППРФ № 1148, 2012), уровень утилизации рассчитывается по формуле:

$$\%_{c \ll u \varepsilon} = 100 - \frac{V_{c \ll u \varepsilon}}{V_{\partial o \delta} + V_{c \ll u \varepsilon}},\tag{7}$$

где V_{сжиг} указанные в данном источнике объёмы сжигания ПНГ; V_{доб} — объёмы добычи без учёта объёмов сжигания.

Данные VNF были раздельно просуммированы с данными по добыче ЕМИСС (Росстат) и «ЦДУ ТЭК». Результат представлен на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 — Сравнение уровня утилизации (%) ПНГ в России по данным Росстата, «ЦДУ ТЭК» и VNF

Примечание — Составлено по: ²⁶.

Итоговый процент утилизации ПНГ в официальных источниках колеблется в диапазоне 79–89% в зависимости от года, по VNF — 76,5–83%. Все источники сходятся в том, что максимальная утилизация наблюдалась в 2015 г., минимальная — в 2012 г.; в 2016 г. произошёл спад утилизации ПНГ. Заметное расхождение в значениях начинается в 2014 году и увеличивается в последующие годы.

Сравнение данных за 1994–2017 гг. Ретроспективное (с 1994 г.) сравнение данных Росстата и «ЦДУ ТЭК» с доступными данным ДЗЗ на основе данных спутника DMSP (алгоритм DNL (Elvidge et al., 2009)) и VNF представлено на рисунке 3.8.

²⁶ См. сноски 23, 25.



Рисунок — 3.8. Объёмы сожжённого ПНГ (в млрд. м³) на территории России за 1994–2017 гг. согласно Росстату, «ЦДУ ТЭК», DNL и VNF Примечание — Составлено по: (Кирюшин и др., 2013),^{27,28,29,30}

На итоговом графике видны аномальные расхождения официальной статистики и измеренных ДЗЗ объёмов сожжённого ПНГ вплоть до 2012 года. Это связано с вероятной ошибкой алгоритма DNL по России и отсутствием измерительных средств большинстве длительным на месторождений вплоть до недавнего времени. Следует учесть, что официальная статистика учитывает только непосредственно ПНГ, тогда как ДЗЗ фиксирует все выбросы, в т. ч. газовых месторождений и объектов переработки. С 2006 г. прослеживается общая динамика наблюдаемых данных по стране. Исключение составляют 2010 и 2015 гг.

²⁷ См. сноску 23.

²⁸ См. сноску 21.

²⁹ Global Gas Flaring Estimates. Earth Observation Group (EOG), NOAA/NGDC. URL: <u>https://ngdc.noaa.gov/eog/interest/flare_docs/BCM_Global_20110223.xlsx</u> (дата обращения: 13.05.2018).

³⁰ Global Gas Flaring Observed from Space. Earth Observation Group (EOG), NOAA/NGDC. URL: <u>https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_global_flare.html</u> (дата обращения: 13.05.2018).

3.3 Возможные потери от сжигания ПНГ

Стоимость продукции. Основными путями экономически выгодной утилизации ПНГ является продажа сжиженного ПНГ потребителям, его переработка на мощностях ГПЗ и использование для электрогенерации.

Продажа товарного ПНГ не является приоритетным направлением его утилизации. Лишь 8% ПНГ поставляется местным потребителям в России (Нижегородов, 2017). Средние цены на ПНГ доступны в БД Росстата³¹; с их помощью можно подсчитать возможную стоимость сожжённого ПНГ, представленную в таблице 3.5.

Таблица 3.5 — Гипотетическая стоимость продажи товарного ПНГ, сожжённого в 2012–2017 гг.

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017				
V ПНГ сожжено, млрд. м ³	19,776	17,293	15,575	16,454	19,219	17,262				
Ср. цена за 1 000 м ³ ПНГ ¹	1941,7	2255,5	2153,7	2047,8	1585,2	1952,1				
Стоимость, млрд. руб. 38,4 39,0 33,5 33,7 30,5						33,7				
Примечание:	Примечание:									
¹ — Источники см. в сно	ске 31									

Наиболее способом ПНГ популярным утилизации является переработка на ГПЗ, куда отправляется половина добываемого в России ПНГ (Нижегородов, 2017). В источнике (Кирюшин и др., 2013: стр. 71) приводится оценка возможной стоимости продуктов переработки на ГПЗ с учётом четырёх возможных технологических схем (см. таблицу 3.7). Для расчёта возможных потерь при сжигании зафиксированных объёмов $\Pi H \Gamma$ необходимы актуальные цены продуктов. Результат представлен в таблице 3.6.

³¹ Средние цены производителей промышленных товаров с 2010 г. по 2016 г. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <u>https://fedstat.ru/indicator/40612</u> (дата обращения: 10.08.2018).

Средние цены производителей промышленных товаров с 2017 г. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <u>https://fedstat.ru/indicator/57606</u> (дата обращения: 10.08.2018).

Категория «газ нефтяной попутный (газ горючий природный нефтяных месторождений)».

Таблица 3.6 — Цены (в рублях) на продукты переработки ПНГ в 2012–2017

Т	٦r	۰.
T	T	٠

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Сухой [отбензиненный] газ (1 тыс. м ³) ¹	2526	2523	3091	3096	2970	3554	
ШФЛУ (1 т) ^{2, 3}	15581	13649	15803	16190	13202		
Пропан и бутан (1 т) ¹	9552	9317	10974	12183	11814	12013	
Сухой газовый бензин (1 тыс. т) ¹	7979	8870	8592	12039	16329	17210	
Полиэтилен (1 т) ²	49170	47863	58881	75961	87912	77722	
Полипропилен (1 т) ²	72892	70946	58351	62115	72920	64977	
Бутадиеновые каучуки (1 т) ¹					73538 ⁴	90040	
Примечание:							
1 — Источники см. в сноске 31							
2 — <u>http://investors.sibur.com/results-c</u>	centre/his	torical-da	ata-book.	.aspx?sc_	lang=ru-l	<u>RU</u> .	
3 — ШФЛУ не является основной реализуемой продукцией компании							
4 —Источник: <u>http://www.ved-stat.ru</u>	/analiz/2	28-rubbe	<u>r-export</u>				

Данные по сухому газу (СОГ), пропану и бутану, сухому газовому бензину (СГБ) и бутадиеновым каучукам (за 2017 г.) взяты из БД Росстата. Данные по ШФЛУ (широкой фракции углеводородов), полиэтилену и полипропилену взяты из БД компании «Сибур». Иные источники указаны в сносках к таблице.

Таблица 3.7 — Возможные технологические схемы по переработке 6 млрд. м³ ПНГ. Единицы измерения даны в тыс. т, если не указано иное

	СОГ (млн. м ³)	ШЛФУ	СГБ	Пропан	Бутан	Полиэтилен	Полипропилен	Бутадиеновый каучук
Схема 1	5220	1620						
Схема 2	5220		540	540	540			
Схема 3	5220		540	_	540	360	120	
Схема 4	5220		540			360	120	480

Примечание — Источник: (Кирюшин и др., 2013).

Затем учитывается отношение зафиксированных объёмов сжигания на преимущественно нефтяных месторождениях к рассматриваемым в отчёте 6 млрд. м³ ПНГ. Полученный результат представлен в таблице 3.8.

Таблица 3.8 —	Расчёт потенциальной	стоимости (в млрд.	руб.) продукции
переработки заф	иксированных в 2012–20	017 гг. объём	иов сжиг	ания ПНГ

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017				
Схема 1	126,7	101,7	108,3	116,2	118,2					
Схема 2	91,7	80,8	84,7	98,2	118,8	117,4				
Схема 3	161,8	140,5	142,5	175,6	227,7	171,2				
Схема 4					320,4	307,4				
Примечание: в	случае о	тсутствия	информ	ации по	цене од	цного из				
продуктов стоимость за	пролуктов стоимость за год не приводится									

Как следует из таблицы, в зависимости от года и сложности технологической схемы, ежегодные потери составляют от 80 до 320 млрд. рублей, что в 3–9 раз больше, чем при прямой продаже ПНГ. Важно отметить, что эти данные носят гипотетический характер, не учитывающие спрос и затраты на строительство объектов транспортировки и переработки рассматриваемых объёмов ПНГ.

Полученные результаты возможно сопоставить с данными, приведёнными С.Е. Донским: в 2013 г. штрафы за сверхнормативное сжигание составили 5,4 млрд. руб., в 2014–2015 гг. — 2 млрд. руб. в год (Донской, 2015).

Электрогенерация. Зафиксированные объёмы сжигания ПНГ возможно сравнить со статистикой использования топлива на крупнейших ГРЭС Ханты-Мансийского АО — Югры. Среди них только Нижневартовская ГРЭС работает исключительно на ПНГ. Согласно статистике Департамента ЖКХ и энергетики ХМАО — Югры, в 2015 г. электростанция выработала 13 930,1 млн. кВт × ч электроэнергии, потребив 3 400 млн. м³ ПНГ³². Экстраполируя полученный результат (выработка 4 млн. кВт × ч на 1 млн. м³ ПНГ) на объёмы сжигания на нефтяных месторождениях, за этот год возможно получить 67 500 млн. кВт × ч выработанной электроэнергии, что лишь на

³² Распоряжение Правительства Ханты-Мансийского автономного округа — Югры «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Ханты-Мансийского автономного округа — Югры на период до 2021 года». (22.07.2016.) URL: <u>https://depjkke.admhmao.ru/deyatelnost/energetika/elektroenergetika/ob-utverzhdenii-skhemy-i-programmy-razvitiya-elektroenergetiki-khanty-mansiyskogo-avtonomnogo-okruga/sipr-na-2017-2021-gody/373912/rasporyazhenie-pravitelstva-khanty-mansiyskogo-avtonomnogo-okruga-yugry-ob-utverzhdenii-skhemy-i-programmy-i</u>

10% ниже средней электрогенерации России в июле³³. (Ср.: в источнике (Зеников, 2017) использующего расчёты Росприроднадзора, приведено значение 70 000 ГВт × ч. (млн. кВт × ч).) В пересчёте на современные цены на ПНГ, затрачиваемый на генерацию на рассматриваемой станции, потери в целом по России составили 45,25 млрд. руб.³⁴.

Собственными силами нефтегазодобывающих компаний электрогенерация производится непосредственно вблизи месторождений на ГТЭС. Так, в Югре в 2017 г. нефтедобывающими компаниями на собственных мощностях было выработано 12 000 кВт × ч электроэнергии³⁵, тогда как из сожжённых объёмов ПНГ (4,4 млрд. м³) возможно было получить более 18 000 кВт × ч.

Подобные расчёты носят гипотетический характер, поскольку для генерации в таких масштабах необходима дополнительная инфраструктура, электроэнергия может быть избыточной, транспортировка ПНГ — нерентабельной. К тому же генерацию нельзя назвать экологически чистым видом утилизации ПНГ.

Эмиссия CO_2 . Метод VNF был также применён для измерения приблизительной эмиссии CO_2 при сжигании ПНГ на газовом факеле и её сравнения с взятыми на себя странами обязательствами в связи с подписанием Парижского соглашения (Elvidge et al., 2018а). Было принято считать ПНГ сожжённым без остатка и состоящим на 100% из метана, который переводился в эмиссию углекислого газа при н. у. Таким образом, на 1 млн. м³ сожжённого ПНГ приходится 1 800 т молекул CO_2 . Применительно к зафиксированным объёмам сжигания ПНГ, это означает эмиссию 35,8–44,6

³⁵ Распоряжение Правительства Ханты-Мансийского автономного округа — Югры от 27.04.2018 № 189-рп «Об одобрении схемы и программы развития электроэнергетики Ханты-Мансийского автономного округа — Югры на период до 2023 года». (27.04.2018.) URL: <u>https://depjkke.admhmao.ru/deyatelnost/energetika/elektroenergetika/ob-utverzhdenii-skhemy-i-programmy-</u> razvitiya-elektroenergetiki-khanty-mansiyskogo-avtonomnogo-okruga/sipr-khmao-yugry-na-period-do-2023/1421736/rasporyazhenie-pravitelstva-khanty-mansiyskogo-avtonomnogo-okruga-yugry-ot-27-04-2018-189гр-оb-оdob (дата обращения: 10.08.2018).

³³ См. <u>https://minenergo.gov.ru/activity/statistic</u>, п. «электронергия».

³⁴ АО «Нижневартовская ГРЭС». Интер РАО — Электрогенерация. 21.05.2018. URL: <u>http://irao-generation.ru/upload/docs/NV_GRES_2019_21.05.2018.pdf</u> (дата обращения: 22.08.2018). Рассчитано по показателям за 2017 г.

млн. т CO₂ в год. Учитывая обязательства России (выход на уровень 70% от эмиссии CO₂-эквивалента в 1990 г.), полная ликвидация сжигания ПНГ на территории страны помогла бы выполнить 1,5% от взятых обязательств. Такой низкий процент сопоставим с вкладом газовых факелов в мировую эмиссию углекислого газа: 1–1,2% (Boden, 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами с помощью данных ночной съёмки со спутника Suomi NPP, обработанной методом VIIRS Nightfire (VNF), был составлен каталог газовых факелов сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) на территории России за 2012–2017 гг. На основании каталога получены оценки объёмов сжигания ПНГ по субъектам РФ и нефтегазовым компаниям. Далее представлено сравнение с официальными данными Росстата и «ЦДУ ТЭК».

Общие уровни сжигания газа в России за 2012–2017 гг. колеблются в диапазоне 20–24,5 млрд. м³, Россия остаётся лидером по сжиганию в мировом масштабе: в 2017 г. в Иране и Ираке — следующих странах по объёмам сжигания — зафиксировано 19 и 18 млрд. м³ выбросов соответственно³⁶. В сопоставимых по уровню добычи нефти странах — США и Саудовской Аравии — зафиксировано 10 и 3 млрд. м³ сожжённого ПНГ соответственно.

До 2016 года крупнейшим регионом по сжиганию ПНГ в России был Ханты-Мансийский АО — Югра, ответственный за более 25% всех выбросов по стране. С 2017 года наибольшие объёмы сжигания зафиксированы в Ямало-Ненецком АО. Более 1 млрд. м³ ПНГ сжигается в Иркутской, Оренбургской и Томской областях; до 2014 года к ним относился Красноярский край. В ХМАО выбросы за период наблюдений заметно сократились (с 7,7 до 4,4 млрд. м³), тогда как в Иркутской области они возросли более чем вдвое (с 1,5 до 3,5 млрд. м³).

³⁶ Global Gas Flaring Observed from Space. Earth Observation Group (EOG), NOAA/NGDC. URL: <u>https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_global_flare.html</u> (дата обращения: 13.05.2018).

ΠΗΓ Среди компаний лидером по сжиганию является «НК "Роснефть"»: на её объектах сжигается 7,5 млрд. м³ ПНГ в год при тенденции утилизации ценного ресурса. Значительны к повышению выбросы «ЛУКОЙЛ» (2,8 млрд. м³/год, причём в 2016 году зафиксирован скачок до 4,2 млрд. м³ сожжённого ПНГ), «Газпром нефти» (2,8 млрд. м³/год). Среди независимых компаний высоки уровни сжигания у «ИНК» и «Русь-Ойл» (900 млн. м³); при этом выбросы других крупных нефтедобытчиков («Татнефть» и «Сургутнефтегаз») заметно ниже (60 и 210 млн. м³/год).

В ходе работы зафиксирована пагубная тенденция ввода новых месторождений в промышленную эксплуатацию без инфраструктуры для утилизации ПНГ с её последующим достраиванием.

При сравнении данных VNF и официальных источников результаты по сжигаемому ПНГ в 2013 году сходятся (различие составляет 1,5 млрд. м³), однако в 2014–2017 гг. различия возрастают (до 7,5 млрд. м³ в 2016 г.). Соответственно, различается процент утилизации ПНГ: согласно VNF он составлял 77,5–83,5% в зависимости от года, тогда как в официальных источниках приводятся значения в 79,5–90%.

В заключение произведён подсчёт возможных потерь от сжигания ПНГ в размере стоимости продажи ПНГ потребителям и потенциальной продукции газонефтехимии. В зависимости от используемой технологической схемы, рассчитанные потери составляют от 30 до320 млрд. рублей ежегодно. Ср.: штрафы за сверхлимитное сжигание ПНГ составили 5 млрд. рублей в 2013 г. и 2 млрд. в 2014 г.

При сравнении статистики сжигания ПНГ с потенциальной электрогенерацией было выявлено, что текущих объёмов сжигания ПНГ может быть достаточно для обеспечения электроэнергией России в один летний месяц (ок. 75 000 млн. кВт × ч) или для 90%-ного покрытия электрогенерации ХМАО — Югры.

Эмиссия CO₂-эквивалента, вызванная сжиганием ПНГ в России, составила 36,5–44,5 млн. т/год. Ликвидация этих выбросов помогла бы

51

России выполнить всего около 1,5% от взятых на себя обязательств по Парижскому соглашению.

ЛИТЕРАТУРА

(Алсынбаев и др., 2013) 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. URL: https://journals.kantiana.ru/upload/iblock/077/Alsynbaev%20K.,%20Bryksin%20 V.,%20Yevtyshkin%20A.,%20Erokhin%20G.,%20Kozlov%20A._131-137.pdf (дата обращения: 13.05.2018). (2013).

(Донской, 2015) Донской, С.Е. Повышение эффективности использования попутного нефтяного газа в России. IV Глобальный форум GGFR: Решения по сокращению объемов сжигания попутного газа. Ханты-Мансийск. URL:

http://vygon.consulting/upload/iblock/a4d/donskoy_globalnyy_forum_png_201509 08.pdf (дата обращения: 10.08.2018). (2015).

(Зеников, 2017) Зеников, С. Попутный нефтяной газ: переработка и использование или утилизация // Pronedra.ru. 03.03.2017. URL: <u>https://pronedra.ru/gas/2017/03/03/pererabotka-poputnogo-neftyanogo-gaza</u> (дата обращения: 22.08.2018). (2017).

(Жижин и др., 2014) Жижин, М.Н., Элвидж, К., Пойда, А.А., Годунов, А.И., Велихов, В.Е., Ерохин, Г.Н., Алсынбаев К.С., Брыксин В.М. Использование данных ДЗЗ для мониторинга добычи углеводородов // Информационные технологии и вычислительные системы. №3. С. 97–111. (2014).

(Жижин и др., 2017) Жижин, М.Н., Элвидж, К., Пойда, А.А. Мультиспектральное дистанционное зондирование ночной поверхности Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14. №3. С. 9–26. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-9-26. URL: <u>http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2017t3/9-26.pdf</u> (дата обращения: 13.05.2018). (2017).

(Кирюшин и др., 2013) Кирюшин, П.А., Книжников, А.Ю., Кочи, К.В., Пузанова, Т.А., Уваров, С.А. Попутный нефтяной газ в России: «Сжигать нельзя, перерабатывать!». М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF). 88 с. URL: <u>https://new.wwf.ru/upload/iblock/dca/wwf_png_net_corrected.pdf</u> (дата обращения: 13.05.2018). (2013).

(Книжников, Ильин, 2017) Книжников, А.Ю., Ильин, А.М. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России — 2017. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF). 34 с. URL: <u>https://new.wwf.ru/upload/iblock/84a/png_2017_web.pdf</u> (дата обращения: 13.05.2018).(2017).

(Кочергин и др., 2017) Кочергин, Г.А.; Куприянов, М.А.; Полищук, Ю.М. Оценка суммарного объёма факельного сжигания попутного газа на нефтедобывающей территории по снимкам Landsat 8. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14. № 5. С. 47–55. URL: <u>http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2017t5/47-55.pdf</u> (дата обращения: 24.10.2018). (2017).

(Нижегородов, 2017) Нижегородов, А.Н. ПНГ: сжигать невыгодно перерабатывать // Neftegaz.ru. №10. URL: <u>https://neftegaz.ru/science/view/1404-</u> <u>PNG-szhigat-nevygodno-pererabatyvat</u> (дата обращения: 13.05.2018). (2017).

(Ромашкина, 2017) Ромашкина М. Нефть Байкала: Иркутская область в нефтегазовой отрасли России. Oilcapital.ru. 01.12.2017. URL: <u>https://oilcapital.ru/article/general/01-12-2017/neft-baykala-irkutskaya-oblast-v-neftegazovoy-otrasli-rossii-9c2b6f0a-b0b2-4116-a942-eb50a5bfbb92</u> (дата обращения: 03.08.2018). (2017).

(Руденко, 2014) Руденко, В.А. Диссертация на соискание на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Разработка и исследование системы метрологического обеспечения измерений и учёта попутного нефтяного газа (на примере OAO "CapatoBheфteras")». Москва. URL: <u>https://www.vniims.ru/download/doc/sovet/Disser-Rydenko.pdf</u> (дата обращения: 21.10 2018). (2014).

(Салиева, 2010) Салиева, Р.Н. Правовое регулирование в сфере использования попутного нефтяного газа // Бизнес, менеджмент и право. №1. URL: <u>http://www.bmpravo.ru/show_stat.php?stat=738</u> (дата обращения: 13.05.2018). (2010).

(Эдер и др., 2016) Эдер, Л.В., Проворная, И.В., Филимонова, И.В. (2016). Добыча и утилизация попутного нефтяного газа как направление комплексного освоения недр: роль государства и бизнеса, технологий и экологических ограничений // Бурение и нефть. №10. URL: <u>http://burneft.ru/archive/issues/2016-10/8</u> (дата обращения: 13.05.2018). (2016).

(ГОСТ Р 8.733–2011) ГОСТ Р 8.733–2011. Системы измерений количества и параметров свободного нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования (с Изменением №1).

(РАНХиГС., 2018) *А/с* х РФ. Детекции горячих точек, выявленных алгоритмом VIIRS Nightfire (VNF) на ночных спутниковых данных Suomi NPP VIIRS, полученных с 2012 по 2017 годы. / Жижин М.Н. (RU), Матвеев А.М. (RU), Пойда А.А. (RU). Правообладатель: Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (RU). [*В печати.*]

(Методика..., 1998) Методика расчёта выбросов вредных веществ в атмосферу при сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках. Приложение № 2 к приказу Госкомэкологии России от 08.04.98 № 199. (1998).

(ППРФ № 1148, 2012) Постановление Правительства РФ от 08.11.2012 №1148 (ред. от 28.12.2017) "Об особенностях исчисления платы за негативное воздействие на окружающую среду при выбросах в атмосферный воздух загрязняющих веществ, образующихся при сжигании на факельных

54

установках и (или) рассеивании попутного нефтяного газа". Законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации. URL: <u>http://legalacts.ru/doc/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-08112012-n-1148/</u> (дата обращения: 13.05.2018).

(Anejionu et al., 2015) 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. Pp. 81–94. (2015).

(Boden et al., 2017) Boden, T.A., Marland, G., and Andres, R.J. National CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751–2014. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00001_V2017. http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/tre_glob_2014.html (дата обращения: 21.10.2018).

(Casadio et al., 2012) Casadio, S., Arino, O., Serpe, D. (2012). Gas flaring monitoring from space using the {ATSR} instrument series // Remote Sensing of Environment. 116. Pp. 239–249. Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR) Special Issue. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.11.022. (2012).

(2017).

(Caseiro et al., 2018) Caseiro, A., Rücker, G., Tiemann, J., Leimbach, D., Lorenz, E., Olaf Frauenberger, O., Kaiser, J.W. Persistent Hot Spot Detection and Characterisation Using SLSTR // Remote Sensing. Vol. 10. Issue 7. 28 p. DOI: 10.3390/rs10071118. URL: <u>http://www.mdpi.com/2072-4292/10/7/1118</u> (дата обращения: 10.08.2018). (2018).

(Dozier, 1981) Dozier, J. A method for satellite identification of surface temperature fields of sub-pixel resolution // Remote Sensing of Environment. 1981. Vol. 11. Pp. 221–229.

(Elvidge et al., 2007) Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Tuttle, B.T., Howard, A.T., Pack, D.W., Milesi, C., et al. A twelve year record of national and global gas flaring volumes estimated using satellite data. Final report to the World Bank.

URL:

http://siteresources.worldbank.org/INTGGFR/Resources/DMSP_flares_20070530_ b-sm.pdf (дата обращения: 21.10.2018). (2007).

(Elvidge et al., 2013b) Elvidge, C.D., Zhizhin, M., Baugh, K.E., Hsu, F.-C. What is so great about nighttime VIIRS data for the detection and characterization of combustion sources? // Proc. Asia-Pacific Adv. Netw. Vol. 35. Pp. 49–61.

(Elvidge et al., 2018a) Elvidge, C.D., Bazilian, M.D., Zhizhin, M., Ghosh, T., Baugh, K.E., Hsu, F.-C. The potential role of natural gas flaring in meeting greenhouse gas mitigation targets // Energy Strategy Reviews. Vol. 20. Pp. 156–162. URL: <u>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X17300962</u> (дата обращения: 10.08.2018). (2018).

(Elvidge et al., 2009) Elvidge, C.D., Ziskin, D., Baugh, K.E., Tuttle, B.T., Ghosh, T., Pack, D.W., Erwin, E.H., Zhizhin, M. A Fifteen Year Record of Global Natural Gas Flaring Derived from Satellite Data // Energies. Vol. 2. Pp. 595–622. DOI:10.3390/en20300595. URL: <u>http://www.mdpi.com/1996-1073/2/3/595/pdf</u> (дата обращения: 13.05.2018). (2009).

(Elvidge et al., 2018b) 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. [In print.]

(Elvidge et al., 2016) 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. Pp. 1–15. DOI:10.3390/en9010014. URL: <u>http://www.mdpi.com/1996-1073/9/1/14/pdf</u> (дата обращения: 13.05.2018). (2016).

(Elvidge et al., 2013a) Elvidge, C.D., Zhizhin, M., Hsu, F.-C., Baugh, K.E. (2013). VIIRS Nightfire: Satellite Pyrometry at Night // Remote Sensing. Vol. 5. Pp. 4423–4449. DOI:10.3390/rs5094423. URL: <u>http://www.mdpi.com/2072-4292/5/9/4423/pdf</u> (дата обращения: 13.05.2018). (2013).

(Faruolo et al., 2018) Faruolo, M., Lacava, R., Pergola, N., Tramutoli, V. On the Potential of the RST-FLARE Algorithm for Gas Flaring Characterization from Space // Sensors. 18. 21 p. doi:10.3390/s18082466. URL: <u>https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6111741/</u> (дата обращения: 24.10.2018). (2018).

(Hodgson, 2018) 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).

(Ismail, Umukoro, 2016) Ismail, O.S., Umukoro, G.E. Modelling combustion reactions for gas flaring and its resulting emissions // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 28. 130–140. doi:https://doi.org/10.1016/j.jksues.2014.02.003. (2016).

(Li et al, 2000) Li, Z., Kaufman, Y.J., Ichoku, C., Fraser, R., Trishchenko, A., Giglio, L., et al. A review of AVHRR-based active fire detection algorithms: principles, limitations, and recommendations. (2000).

(Zhang et al., 2015) Zhang, X., Scheving, B., Shoghli, B., Zygarlicke, C., Wocken, C. Quantifying Gas Flaring CH₄ Consumption Using VIIRS // Remote Sensing of Environment. 7. 9529–9541. (2015).

(Zhizhin et al., 2013) Zhizhin, M., Elvidge, C.D., Hsu, F-C., Baugh, K.E. Using the short-wave infrared for nocturnal detection of combustion sources in VIIRS data // Proc. Asia-Pacific Adv. Netw. Vol. 35. Pp. 49–61.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 — Структура базы данных «горячих точек» VIIRS Nightfire

Структура БД представлена в виде двух групп таблиц VIIRS Nightfire, которые содержат 3 таблицы с параметрами горячих точек, обнаруженных алгоритмом VNF на ночных изображениях со спутников Suomi NPP и JPSS-1 (NOAA-20). Информация о континуальных «горячих точках» (вроде газовых факелов или вулканов) включает в себя их географические границы (векторные многоугольники) и параметры облачности в момент пролёта спутника над ними (необходима для оценки вероятности детектирования).

Отношение (таблица БД) VNF имеет те же атрибуты (имена и типы данных), что и в ежедневных файлах CSV (см. п. 2.2). В базе данных координаты обнаружения индексируются пространственным индексом VBD_GIX. Ниже приведен фрагмент кода SQL для создания и индексации отношения VNF. Расшифровка названий полей базы данных VNF представлена далее в таблице A.1.

SQL-код для создания таблицы VIIRS Nightfire:

CREATE TABLE IF NOT EXISTS vnf (PGID SERIAL PRIMARY KEY, id INTEGER, id_Key TEXT UNIQUE, Date_Proc TIMESTAMP, Lat GMTCO DOUBLE PRECISION, Lon GMTCO DOUBLE PRECISION, Date Mscan TIMESTAMP, Temp BB DOUBLE PRECISION, Temp_Bkg DOUBLE PRECISION, ESF BB DOUBLE PRECISION. RHI DOUBLE PRECISION, RH DOUBLE PRECISION, Methane_EQ DOUBLE PRECISION, CO2_EQ DOUBLE PRECISION, Area Pixel DOUBLE PRECISION, Area_BB DOUBLE PRECISION, Cloud_Mask INTEGER, **QF** Fit INTEGER, QF_Detect INTEGER,

Rad DNB DOUBLE PRECISION, Rad M07 DOUBLE PRECISION, Rad M08 DOUBLE PRECISION, Rad M10 DOUBLE PRECISION. Rad M12 DOUBLE PRECISION, Rad_M13 DOUBLE PRECISION, Rad M14 DOUBLE PRECISION, Rad M15 DOUBLE PRECISION, Rad M16 DOUBLE PRECISION. Tran DNB DOUBLE PRECISION. Tran M07 DOUBLE PRECISION, Tran M08 DOUBLE PRECISION. Tran M10 DOUBLE PRECISION, Tran M12 DOUBLE PRECISION, Tran M13 DOUBLE PRECISION, Tran M14 DOUBLE PRECISION, Tran M15 DOUBLE PRECISION, Tran_M16 DOUBLE PRECISION, PThm M12 DOUBLE PRECISION. PThm M13 DOUBLE PRECISION, PThm M14 DOUBLE PRECISION, PThm M15 DOUBLE PRECISION, PThm M16 DOUBLE PRECISION, OF1 DNB INTEGER, OF1 M07 INTEGER, QF1 M08 INTEGER, QF1_M10 INTEGER, QF1_M12 INTEGER, QF1 M13 INTEGER, QF1_M14 INTEGER, QF1 M15 INTEGER, QF1 M16 INTEGER, COT_IVCOP DOUBLE PRECISION, EPS IVCOP DOUBLE PRECISION, OF1 IVCOP INTEGER, OF2 IVCOP INTEGER, QF3 IVCOP INTEGER, DN M10 INTEGER. Sample M10 INTEGER, Line_M10 INTEGER, Sample_BT INTEGER, Line BT INTEGER, Sample_DNB INTEGER, Line DNB INTEGER, Lat_DNB DOUBLE PRECISION, Lon DNB DOUBLE PRECISION. Dist DNB DOUBLE PRECISION, Thr_M07 DOUBLE PRECISION, Thr M08 DOUBLE PRECISION, Thr M10 DOUBLE PRECISION, Thr M16 DOUBLE PRECISION, SOLZ_GMTCO DOUBLE PRECISION, SOLA GMTCO DOUBLE PRECISION, SATZ GMTCO DOUBLE PRECISION, SATA_GMTCO DOUBLE PRECISION, SCVX GMTCO DOUBLE PRECISION. SCVY GMTCO DOUBLE PRECISION, SCVZ_GMTCO DOUBLE PRECISION, SCPX GMTCO DOUBLE PRECISION, SCPY GMTCO DOUBLE PRECISION. SCPZ GMTCO DOUBLE PRECISION, SCAX GMTCO DOUBLE PRECISION, SCAY_GMTCO DOUBLE PRECISION, SCAZ GMTCO DOUBLE PRECISION. OF1 GMTCO INTEGER, QF2 GMTCO INTEGER, QF1_IICMO INTEGER, QF2_IICMO INTEGER, QF3 IICMO INTEGER, QF4_IICMO INTEGER, QF5 IICMO INTEGER, QF6_IICMO INTEGER, Lat_Gring TEXT, Lon_Gring TEXT, CH_M12 TEXT, CH M13 TEXT, File M07 TEXT. File M08 TEXT, File M10 TEXT, File_M12 TEXT, File M13 TEXT, File_M14 TEXT, File M15 TEXT, File_M16 TEXT, File_DNB TEXT, File_Geo_DNB TEXT, File_GMTCO TEXT, File GDNBO TEXT, File IICMO TEXT, File IVCOP TEXT, File AC TEXT); SELECT AddGeometryColumn('public', 'vnf', 'geom', 4326, 'POINT', 2); CREATE INDEX vnf_gix ON vnf USING GIST(geom); """) # checks to see if table exists and makes a fresh table.

Таблица А.1 — Расшифровка названий полей базы данных VIIRS Nightfire

Поле	Описание	Единицы
	Уникальный идентификатор горячей точки. Уникальность	
id	гарантируется только в пределах	
Date_Proc	Время обработки данных	дата/время

Таблица А1 (продолжение)

Lat GMTCO	Широта горячей точки из GMTCO файла	o
Lon GMTCO	Долгота горячей точки из GMTCO файла	0
Date Mscan	Время наблюдения горячей точки	дата/время
Темр ВВ	Температура горячей точки (по методу Nightfire)	°K
ESF_BB	Коэффициент серого горячей точки (по методу Nightfire)	
RHI	Светимость горячей точки (по методу Nightfire)	BT/M ²
RH	Мощность излучения горячей точки (по методу Nightfire)	W
Methane_EQ	Эквивалентный расход метана (по методу Nightfire)	нм ³ /с
CO2_EQ	Эквивалентный выброс CO ₂ (по методу Nightfire)	г/с
Area_Pixel	Площадь на местности пикселя в M-канале VIIRS	M ²
Area BB	Плошаль поверуности горяней тонки (по метолу Nightfire)	M^2
OF BR Temp	Флаг качества оценки параметров горячей точки	
OF Detect	Флаг качества летектирования горячей точки	
	Яркость в канале VIIRS DNB (0.7 мкм). Изменены елиницы	
Rad DNB	$Br/cm^2/sr$ на $Br/m^2/sr/мкм путем умножения на 25000.$	Bт/м²/sr/мкм
Rad M07	Яркость в канале VIIRS M7 (0.865 мкм)	$BT/M^2/sr/MKM$
Rad M08	Яркость в канале VIIRS M8 (1 240 мкм)	BT/M ² /sr/MKM
Rad_M10	Sprocti B Kanade VIIRS MI0 (1.240 MKM)	$BT/M^2/sr/MKM$
Rad_M12	Sprocti p roughe VIIPS M12 (3.7 MrM)	BT/M/SI/MKM
Rad_W12	$\mathbf{g}_{\text{PKOCTL}, \text{P}} = \mathbf{g}_{\text{PKOCTL}, $	DT/M/ST/MRM
Rad_W115	Approcess B Rahade VIIRS M13 (4.05 MRM)	
Rad_M14	Яркость в канале VIIRS M14 (8.55 мкм)	$BT/M^2/ST/MKM$
Rad_M15	Яркость в канале VIIRS M15 (10.763 мкм)	BT/M ² /Sr/MKM
Rad_MI6	Яркость в канале VIIRS M16 (12.013 мкм)	BT/M ² /sr/MKM
QFI_DNB	Флаг качества данных в канале VIIRS DNB	
QF1_M07	Флаг качества данных в канале VIIRS М7	
QF1_M08	Флаг качества данных в канале VIIRS M8	
QF1_M10	Флаг качества данных в канале VIIRS M10	
QF1_M12	Флаг качества данных в канале VIIRS M12	
QF1_M13	Флаг качества данных в канале VIIRS M13	
QF1_M14	Флаг качества данных в канале VIIRS M14	
QF1_M15		
QF1_M16		
Cloud Mask	Маска облаков, извлеченная из битов 5–4 в QF1 фаила	
	Ourseling to the attraction of the track of the second sec	
EDS IVCOD	Оптическая толща атмосферы из файла VIIRS IVCO	
OF1_IVCOP	Размер канель в облаке из файла VIIRS IVCOP	МКМ
OF2 WCOP		
OF3 IVCOP	исог (оптические своиства облаков) флаг 2	
		Dm/2/an/
Avg_M10	Среднее значение в канале М10 для всего изображения	BT/M ² /Sr/MKM

Стандартное отклонение в канале М10 для всего Std M10 изображения BT/M²/sr/MKM Множитель (число стандартных отклонений) для детектора Nsigма M10 в канале М10 DN M10 BT/M²/sr/MKM Целое значение с сенсора в пикселе VIIRS M10 Sample M10 Столбец пикселя на изображении VIIRS M10 (отсчет с 1) Line M10 Строка пикселя на изображении VIIRS M10 (отсчет с 1) Столбец пикселя ближайшего локального максимума на Sample DNB изображении DNB (отсчет с 1) Строка пикселя ближайшего локального максимума на Line_DNB изображении DNB (отсчет с 1) Широта пикселя ближайшего локального максимума на 0 Lat GDNB изображении DNB из GDTCN файла Долгота пикселя ближайшего локального максимума на 0 изображении DNB из GDNBO файла Lon_GDNB Расстояние до ближайшего локального максимума на Dist_DNB изображении DNB КМ Азимут ближайшего локального максимума на 0 Az_DNB изображении DNB THR M07 BT/M²/sr/mkm Порог детектирования в канале М7 THR M08 Порог детектирования в канале М8 Bt/m²/sr/mkm THR M12 Порог детектирования в канале М12 BT/m²/sr/mkm THR M13 Порог детектирования в канале М13 BT/M²/sr/mkm 0 SOLZ GMTCO Зенитный угол Солнца (из файла VIIRS GMTCO) 0 SOLA GMTCO Азимутальный угол Солнца (из файла VIIRS GMTCO) 0 SATZ GMTCO Зенитный угол спутника (из файла VIIRS GMTCO) 0 SATA GMTCO Азимутальный угол спутника (из файла VIIRS GMTCO) SCVX GMTC Компонента X вектора скорости спутника (из файла VIIRS м/с GMTCO) 0 SCVY GMTC Компонента У вектора скорости спутника (из файла VIIRS м/с GMTCO) 0 Компонента Z вектора скорости спутника (из файла VIIRS м/с SCVZ GMTCO GMTCO) Координата Х положения спутника (из файла VIIRS Μ SCPX GMTCO **GMTCO**) Координата У положения спутника (из файла VIIRS Μ SCPY GMTCO GMTCO) Координата Z положения спутника (из файла VIIRS Μ SCPZ GMTCO GMTCO) SCAX GMTC Координата Х вектора направления на спутник (из файла " VIIRS GMTCO) 0 SCAY GMTC Координата У вектора направления на спутник (из файла " VIIRS GMTCO) 0

Таблица А1 (продолжение)

1 (I TY /	
	Координата Z вектора направления на спутник (из файла	.,
SCAZ_GMTCO	VIIRS GMTCO)	
QF1_GMTCO	Флаг качества данных 1 (из файла VIIRS GMTCO)	
QF2_GMTCO	Флаг качества данных 2 (из файла VIIRS GMTCO)	
QF1_IICMO	Флаг качества данных 1 (из файла VIIRS IICMO)	
QF2_IICMO	Флаг качества данных 2 (из файла VIIRS IICMO)	
QF3_IICMO	Флаг качества данных 3 (из файла VIIRS IICMO)	
QF4_IICMO	Флаг качества данных 4 (из файла VIIRS IICMO)	
QF5_IICMO	Флаг качества данных 5 (из файла VIIRS IICMO)	
QF6_IICMO	Флаг качества данных 6 (из файла VIIRS IICMO)	
	Список координат (широта) для вершин полигона границы	
Lat_Gring	изображения М10	0
	Список координат (долгота) для вершин полигона границы	
Lon_Gring	изображения М10	0
File_M07	Имя файла с изображением VIIRS M7 HDF5	
File_M08	Имя файла с изображением VIIRS M8 HDF5	
File_M10	Имя файла с изображением VIIRS M10 HDF5	
File_M12	Имя файла с изображением VIIRS M12 HDF5	
File_M13	Имя файла с изображением VIIRS M13 HDF5	
File_M14	Имя файла с изображением VIIRS M14 HDF5	
File_M15	Имя файла с изображением VIIRS M15 HDF5	
File_M16	Имя файла с изображением VIIRS M16 HDF5	
File_DNB	Имя файла с изображением VIIRS DNB HDF5	
File_GMTCO	Имя файла данных VIIRS GMTCO HDF5	
	Имя файла данных геопривязки изображения в канале	
File_GDNB	VIIRS HDF5 (GDNBO или GDTCN)	
File_IICMO	Имя файла данных VIIRS IICMO HDF5	
	Имя файла данных VIIRS IVCOP HDF5	
File_IVCOP	Может содержать список имен	

Таблица А1 (продолжение)