

Мультиспектральное дистанционное зондирование ночной поверхности Земли

М.Н. Жижин^{1,2,3}, К. Элвидж², А.А. Пойда^{4,3}

¹Университет Колорадо, Брумфилд, 80020, США
E-mail: mikhail.zhizhin@colorado.edu

²Национальный информационный центр по окружающей среде НОАА
Болдер, 80305, США
E-mail: chris.elvidge@noaa.gov

³Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
⁴Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Москва, 123098, Россия
E-mail: poyda_aa@nrcki.ru

В последние годы наблюдается рост числа низкоорбитальных и геостационарных спутников, оснащенных мультиспектральными камерами в видимом (0,4–1 мкм) и ближнем – среднем – дальнем ИК-диапазонах (1–20 мкм), способными видеть ночную поверхность Земли. Традиционно целью ночных мультиспектральных наблюдений являются облачный покров и лесные пожары. Облака и пожары наблюдаются как днем, так и ночью – и из-за этого алгоритмы детектирования облаков и пожаров делают «универсальными», что приводит к снижению их чувствительности ночью, когда нет солнечной засветки. Поэтому «окном возможностей» для новых приложений и алгоритмов в ДЗЗ является разработка специализированных алгоритмов детектирования и распознавания ночных мультиспектральных изображений. Наиболее перспективным для анализа ночных мультиспектральных изображений является сенсор VIIRS на спутниках Suomi NPP и JPSS-1. В статье дается обзор основных задач мультиспектрального дистанционного зондирования ночной поверхности Земли из космоса, которые могут быть решены с использованием специализированных алгоритмов, включая картирование стабильных ночных огней, детектирование факелов сжигания попутного газа, отслеживание судовых огней при ночном рыболовстве, а также рассматриваются различные источники данных и методы обработки мультиспектральных изображений ночной поверхности Земли.

Ключевые слова: ДЗ ночной поверхности Земли, мультиспектральное ДЗЗ, DMSP, VIIRS, ночные огни, факелы сжигания ПНГ, рыболовные судовые огни

Одобрена к печати: 10.12.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-9-26

Введение

Начиная с 1970-х годов дистанционное зондирование ночной поверхности Земли (ДЗНПЗ) применялось в первую очередь метеорологами в США для обнаружения облаков льда и снега в видимом диапазоне при падающем на них лунном свете, а также обнаружения облаков в ИК-диапазоне в отсутствии лунной засветки. Для этого Министерством обороны США была развернута программа Defense Meteorological Satellite Program (DMSP). На низкоорбитальных спутниках DMSP установлен оптический телескоп с возможностью ночного видения Operational Linescan System (OLS). Данные DMSP-OLS используются совместно как военными, так и гражданскими метеорологами из Национального управления по проблемам океана и атмосферы США (NOAA).

Анализ изображений ночной поверхности Земли в видимом и ближнем ИК-диапазоне (Visible Near-Infrared, VNIR) со спутников DMSP показал, что помимо облаков они содержат смешанный сигнал от: 1) электрических огней людских поселений, наземного транспорта и кораблей; 2) источников горения – пожаров, факелов, вулканов; 3) отражения лунного света с верхних облаков, рельефа, снежного покрова и поверхности воды;

4) полярных сияний; 5) помех в канале регистрации – вспышек на сенсоре и в оптике из-за попадания космических лучей и паразитных бликов из-за прямого попадания на спутник солнечного света. При этом отношение сигнала и помех зависит от фазы Луны и положения спутника относительно магнитного поля Земли.

В новолуние при отсутствии облаков хорошо видны огни городов и транспорта, пожары, газовые факелы, вулканы, грозовые разряды и полярные сияния. При полной луне подсвечиваются облака, снежный и ледовый покров, рельеф местности (особенно пустыни), но на этом фоне теряют контрастность сигналы, которые хорошо были видны в новолуние.

Пространственное распределение и динамика во времени ночных огней на изображениях DMSP-OLS исследовались в экологии, демографии, экономике, климатологии, океанографии и космической погоде. Обзор 144 научных публикаций из 67 реферируемых зарубежных журналов за период с 1992 г. по 2013 г. (Huang et al., 2014) показал, что основным направлением ДЗНПЗ с использованием DMSP-OLS является *выделение, классификация и анализ трендов яркости стабильных ночных огней* (СНО) на фоне эфемерных сигналов от пожаров, полярных сияний, молний, снежно-ледового покрова и облаков. Отметим, что половина из этих работ была опубликована в 2010-2013 гг.

Первоначально изображения со спутников принимались в виде аналогового телевизионного сигнала и регистрировались на фотопленку. Начиная с 1992 г. данные со спутников DMSP передаются в виде цифровых изображений. Ввиду низкого разрешения изображений DMSP-OLS общий объем архива данных сравнительно невелик и составляет 30 ТБайт.

Несмотря на исключительную важность данных DMSP для ДЗНПЗ, первое поколение спутников с камерой ночного видения имеет ряд существенных недостатков (Elvidge et al., 2007):

- 1) относительно низкое пространственное разрешение;
- 2) отсутствие функции калибровки сенсора на спутнике;
- 3) ограниченный динамический диапазон сенсора (6-битное квантование), дающий лишь 64 градации серого;
- 4) засветка сенсора в центрах больших городов и газовых факелов при стандартном коэффициенте усиления (настраивается на слабо освещенные облака);
- 5) ограниченный доступ к «сырым» данным со спутника.

Существенным ограничением для использования данных DMSP в дальнейших исследованиях ДЗНПЗ является плачевное состояние группировки спутников. Сенсор на спутнике F18 деградировал и не может далее использоваться для ДЗНПЗ. Запущенный на смену F18 спутник F19 не проработал на орбите и двух лет и в июле 2016 г. был выведен из эксплуатации из-за потери питания.

На смену космической программе DMSP, которая финансировалась Министерством обороны США на протяжении последних 50 лет, в октябре 2011 г. совместно NOAA и NASA был запущен новый метеорологический спутник Suomi NPP, который является первым в серии спутников Joint Polar Satellite System (JPSS). Данные с этих спутников можно

получать не только из глобального архива (с большой задержкой), но и на станциях прямого приема в момент прохождения над ними спутников JPSS.

Программа JPSS обобщает 50-летний опыт метеонаблюдений из космоса с помощью спутников DMSP и двух экспериментальных спутников Aqua и Terra, запущенных NASA в 1999 и 2002 годах. На спутниках JPSS устанавливается мультиспектральная камера видимого и ИК диапазонов VIIRS с шириной охвата 3000 км, которая позволяет вести высокочувствительные наблюдения ночной поверхности Земли.

Орбиты спутников DMSP и Suomi NPP похожи, но качество ночных данных у нового спутника значительно выше (Elvidge, Vaugh et al., 2013). Качественное отличие пространственного разрешения и динамического диапазона в видимом канале DNB сенсора VIIRS по сравнению с OLS DMSP иллюстрирует *рис. 1*, на котором показаны изображения огней рыболовных судов и поселений в Юго-Восточной Азии, полученные в одну ночь с помощью VIIRS и OLS.

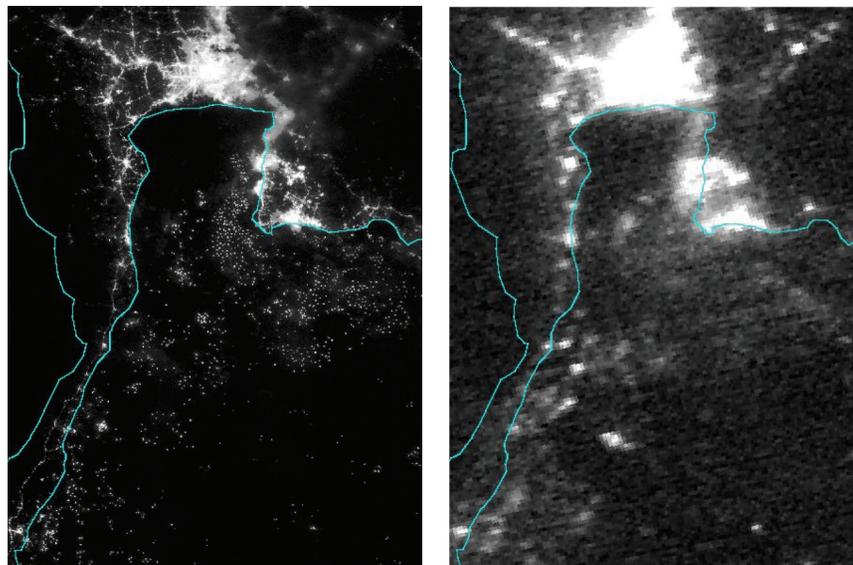


Рис. 1. Изображение флотилии рыболовных судов в Юго-Восточной Азии, полученные в одну ночь с помощью DNB-VIIRS (слева, 14.04.2012 1:30) и OLS-DMSP (справа, 15.04.2012 19:30)

Следует подчеркнуть важное отличие VIIRS от сенсоров MODIS, которые не имеют высокочувствительного панхроматического (ночного видимого) канала и не передают ночью изображения в ближнем ИК (каналы DNB, M7, M8, M10 и M11 у сенсора VIIRS). Канал M11 ночью на Suomi NPP пока работает в экспериментальном режиме (отдельные орбиты), но должен быть включен в оперативный режим сразу на двух спутниках после запуска JPSS-1 в 2017 г. Графики относительной спектральной чувствительности (Relative Spectral Response, RSR) для ночных каналов VIIRS показаны на *рис. 2*.

Представление о сложности мультиспектрального распознавания «полезных» источников дает раскладка по каналам VIIRS ночной сцены в Ираке 17 июля 2012 г., показанной на *рис. 3*. На нем видны электрические огни и факелы сжигания попутного нефтяного газа в видимом канале DNB, только факелы в SWIR-каналах M7, M8 и M10 и факелы

на фоне дымовых шлейфов, облаков и неравномерно нагретого рельефа в MWIR каналах M12, M13. В видимом канале хорошо видно «галло» вокруг самых ярких огней, возникающее из-за многократного рассеяния в атмосфере и дыме.

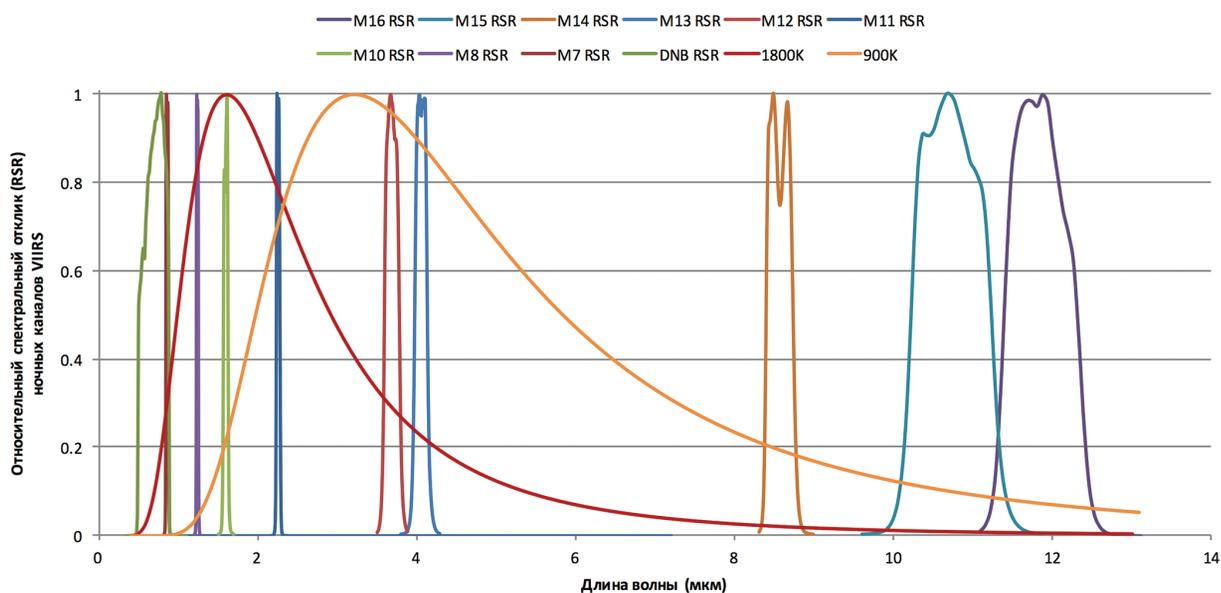


Рис. 2. Спектральные характеристики (Relative Spectral Response, RSR) ночных каналов VIIRS

Для обнаружения на ночных снимках источников всех перечисленных выше классов необходимо использовать независимые детекторы «полезного» сигнала сразу в нескольких спектральных полосах. Если сигнал от источника превышает уровень шума в нескольких каналах, то применим новый мультиспектральный алгоритм оценки его параметров VIIRS Nightfire.

Представляет интерес ночное использование аналогичных ИК-каналов на новейших спутниках «среднего» разрешения Landsat 8 (30 м на пиксель) и Sentinel 2 (10 м на пиксель). К сожалению, ночные снимки с Sentinel 2 не доступны, а для Landsat 8 достаточно редки. По запросу авторов в 2015 г. Landsat 8 снимал ночью лесные пожары в Индонезии, и на основе этих снимков была получена карта торфяных пожаров на Суматре (Elvidge et al., 2015c).

1. Классификация стабильных ночных огней

Математический метод и вычислительные алгоритмы для выделения и классификации стабильных ночных огней на VNIR изображениях DMSP были разработаны в NGDC, научным коллективом под руководством д-ра К. Элвиджа (Hsu et al., 2015). В методе CHO можно выделить 5 основных шагов (используется библиотека функций на языке IDL с закрытым кодом):

1. Первичная обработка сырых данных со спутников для выделения безоблачных областей и частичного удаления эфемерных сигналов (молний, полярных сияний). Заметим, что разделение огней на классы «пожар» – «газовый факел» – «электрический свет» на этом этапе еще невозможно. Обработка ведется в проекции спутника.

2. Изменение проекции «очищенных» изображений со спутника на географическую координатную сетку (карту мира) с фиксированным шагом 30 угл. сек. Шаг сетки на экваторе примерно равен размеру пикселя изображения до изменения проекции.

3. Статистический анализ яркости и повторяемости огней, видимых на разных орбитах с одного и того же спутника, дающий на выходе 3 растра: 1) число безоблачных наблюдений (cloud free coverage) в каждой точке за период времени «месяц» или «год»; 2) средняя яркость ночных огней в каждой точке (average visible lights); 3) число детекций выше шумового порога в точке, нормированной на число безоблачных наблюдений (percent frequency of light detection, PCT). Карта СНО получается попиксельным перемножением карты средней яркости на процент безоблачных детекций.

4. Регрессионный анализ средних яркостей ночных огней, видимых с нескольких спутников. Попарная калибровка производится сравнением значений яркости для небольшого подмножества огней, про которые заранее известно, что они не менялись на протяжении нескольких лет (например, небольшие поселения с постоянным числом жителей).

5. Разделение ночных огней на классы «пожар» – «газовый факел» – «электрический свет» по яркости, повторяемости в отдельной точке и форме кластеров огней в соседних точках.

С 1992 г. ночные изображения Земли передавали 6 спутников DMSP с обозначениями F-10, F-12, F-14, F-15, F-16 и F-18. За исключением пары F-16 и F-18, новый спутник запускался до истечения срока эксплуатации предыдущего. Поэтому в большинстве случаев имеются перекрытия по годам, когда данные поступали сразу с двух спутников. Это позволило произвести взаимную калибровку яркости ночных огней, видимых в разные годы с разных спутников. Значения яркости до калибровки могут отличаться не только для разных инструментов (спутников), но и изменяться со временем ввиду изменений характеристик (старения) одного инструмента.

В 2014 г. в работе (Elvidge et al., 2014) был разработан метод оценки и визуализации динамики плотности населения, НВП и эффективности энергопотребления по межгодовым изменениям суммы СНО. Для этого применяется регрессионный анализ макроэкономических и демографических показателей, полученных из других источников с суммой яркостей СНО по странам (внутри политических границ). Входные данные представлены в виде растровых изображений на регулярной сетке широт-долгот и свободно доступны из Национального геофизического центра данных (National Geophysical Data Center, NGDC) NOAA¹. Скопировав эти растры в свое облако данных, инженеры проекта Google Earth Engine² на AGU Fall Meeting 2016 продемонстрировали возможности своей платформы для

¹ <https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html>

² <https://github.com/google/earthengine-api>

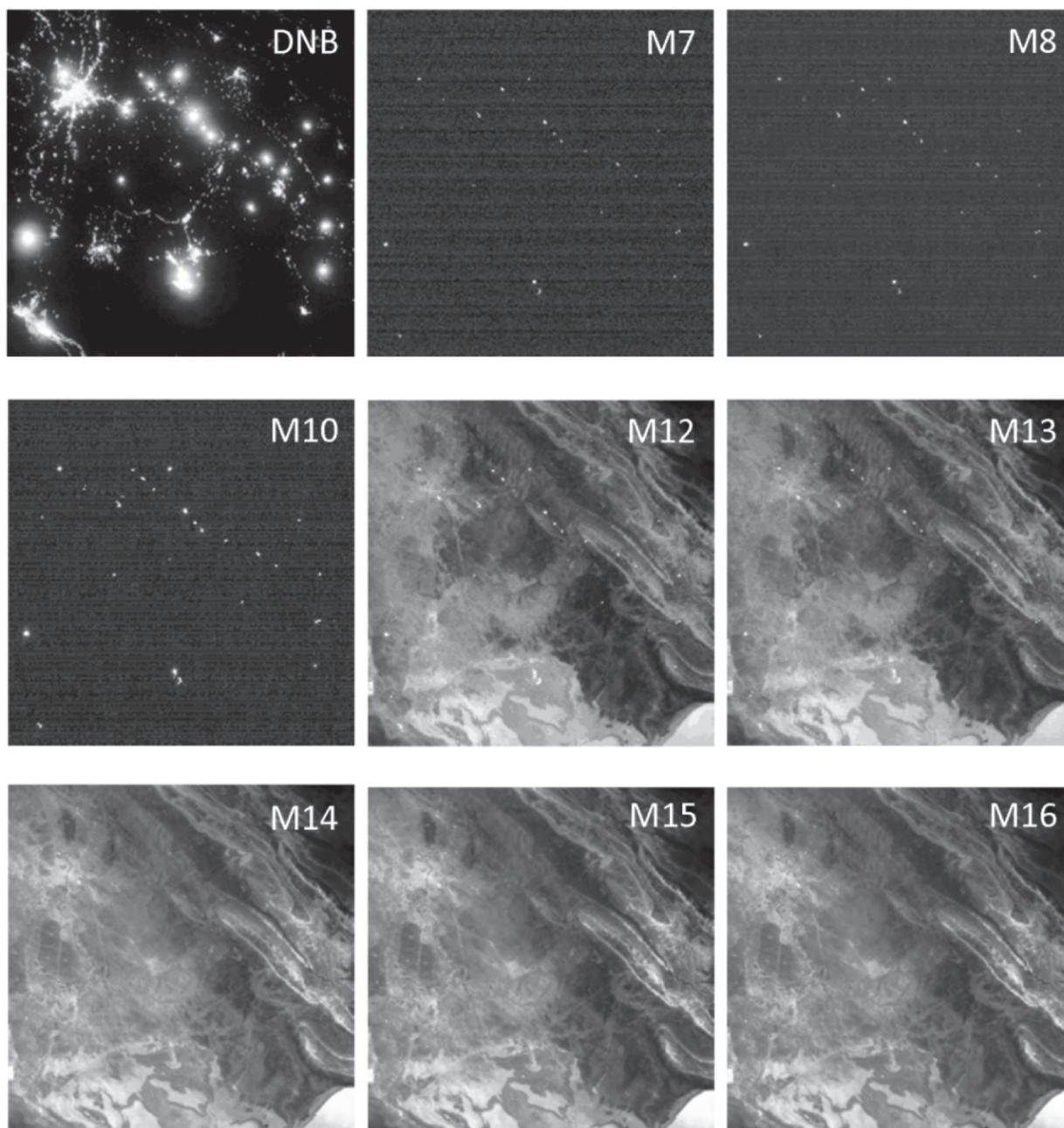


Рис. 3. Изображения в видимом и ИК каналах для ночных огней городов и газовых факелов в Ираке

распределенной обработки данных ДЗЗ с помощью локального регрессионного анализа и визуализации изменений (трендов) в каждом пикселе раstra, фрагмент которой для СНО Европы показан на *рис. 4*.

В 2009 г. был опубликован метод оценки объемов сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) по странам (Elvidge et al., 2009) и проанализированы изменения объемов сжигания по годам за многолетний период наблюдений DMSP-OLS с 1994 г. по 2008 г. Разделение ночных огней на классы «пожар» – «газовый факел» – «электрический свет» по яркости, повторяемости в отдельной точке и форме кластеров огней в соседних точках для данных со спутников DMSP производилось вручную. Была получена оценка общего объема

сжигания всеми странами на уровне 150 млн куб. м в год (Billion Cubic Meters, BCM), которая мало меняется во времени. Оценки объемов по годам для России, которая бесспорно занимает первое место по этому показателю, показаны на *рис. 5*, из которых можно сделать вывод, что пик по сжиганию ПНГ Россией был пройден в 2005 г.



Рис. 4. Визуализация макроэкономической и демографической динамики в Европе по трендам яркости СНО за период с 1991 г. по 2013 г. с помощью Google Earth Engine. Красным показаны пиксели с положительным трендом, синим – с отрицательным. Яркость изображения зависит от скорости изменения СНО

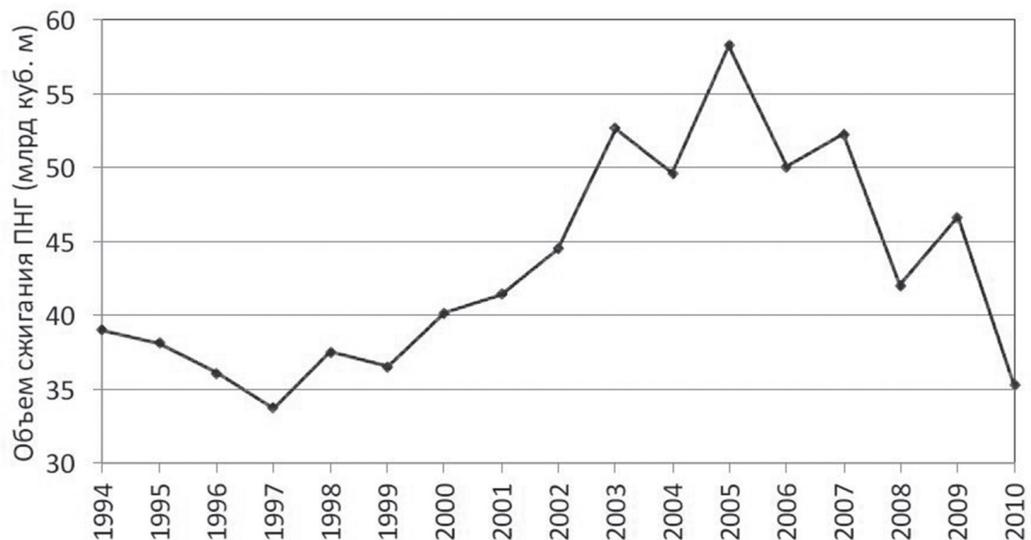


Рис. 5. Годовые объемы сжигания ПНГ для России (BCM). Оценка по сумме яркостей ночных огней от газовых факелов

Работа по созданию ежегодных и ежемесячных карт СНО по изображениям VIIRS, аналогичных картам DMSP-OLS, началась сразу после запуска спутника Suomi NPP в начале 2012 г. параллельно независимыми научными коллективами в NOAA и NASA. Но напрямую перенести методику обработки данных, разработанную для DMSP-OLS, не удалось по следующим причинам:

- 1) увеличился на 3 порядка объем данных и пропорционально время его обработки;
- 2) необходима автоматизация задач, ранее выполнявшихся экспертом вручную (например, фильтрации пожаров и полярных сияний);
- 3) недоработки программного обеспечения первичной обработки данных;
- 4) сложная геометрия изображений и различные системы координат для разных спектральных полос (видимого и ИК-диапазонов);
- 5) разнообразие помех, связанных с конструкцией или обусловленных большей чувствительностью сенсора.

Первая версия петапиксельной карты средней яркости ночных огней Земли (без учета их повторяемости) по данным VIIRS за неполный 2012 г. под названием NASA Black Marble была представлена в декабре 2012 г. на специальной пресс-конференции AGU Fall Meeting 2012 и получила широкий резонанс в СМИ. Фрагмент карты Black Marble для Европы показан на *рис. 6*. Этим методом получают ежемесячные карты средней яркости ночных огней, которые на момент составления обзора свободно доступны на сайте NGDC³ за период с апреля 2012 г. по ноябрь 2016 г. В связи с возникшим комплексом программно-аппаратных проблем ежегодные карты средней яркости и стабильных ночных огней (с учетом повторяемости) можно ожидать в первом полугодии 2017 г.



Рис. 6. Фрагмент петапиксельной карты средней яркости ночных огней Земли за неполный 2012 г. NASA Black Marble

³ https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_monthly.html

2. Быстрые изменения ночных огней

Быстрые изменения ночных огней (блэкауты) происходят вследствие природных или техногенных катастроф, таких как землетрясения (Катманду, апрель 2015 г.), тайфуны (Нью-Йорк, ноябрь 2012 г.), конфликты (Крым, ноябрь–декабрь 2015 г.). Масштаб явления можно оценить путем сравнения ночных огней до и после катастрофы. В качестве эталона можно использовать свежие карты стабильных ночных огней. Задача осложняется наличием облаков и лунной засветкой исследуемой сцены. Сопутствующие изображения – продукты ДЗЗ высокого уровня (карты облаков, оптической толщи и аэрозолей в атмосфере) – недостаточно точны для уверенного выделения области, где огни исчезли из-за блэкаута, а не закрыты облаками.

Возможности анализа быстрых изменений СНО в зонах региональных конфликтов показаны в работе (Witmer, O'Loughlin, 2011), посвященной серии конфликтов на Северном Кавказе в 2000 и 2008 годах. В работе показано, что изменения СНО коррелируют не только с площадью пожаров в зоне боевых действий, но и с изменениями транспортных потоков по основным автомагистралям.

В период подготовки карты средних яркостей 9–10 ноября 2012 г. произошло веерное отключение электричества на восточном побережье США в результате тайфуна Sandy. Сравнение оперативных снимков со спутника ночью 9 ноября, аэрофотоснимка над Нью-Йорком и карты ночных огней до тайфуна показаны на *рис. 7*. В красном канале

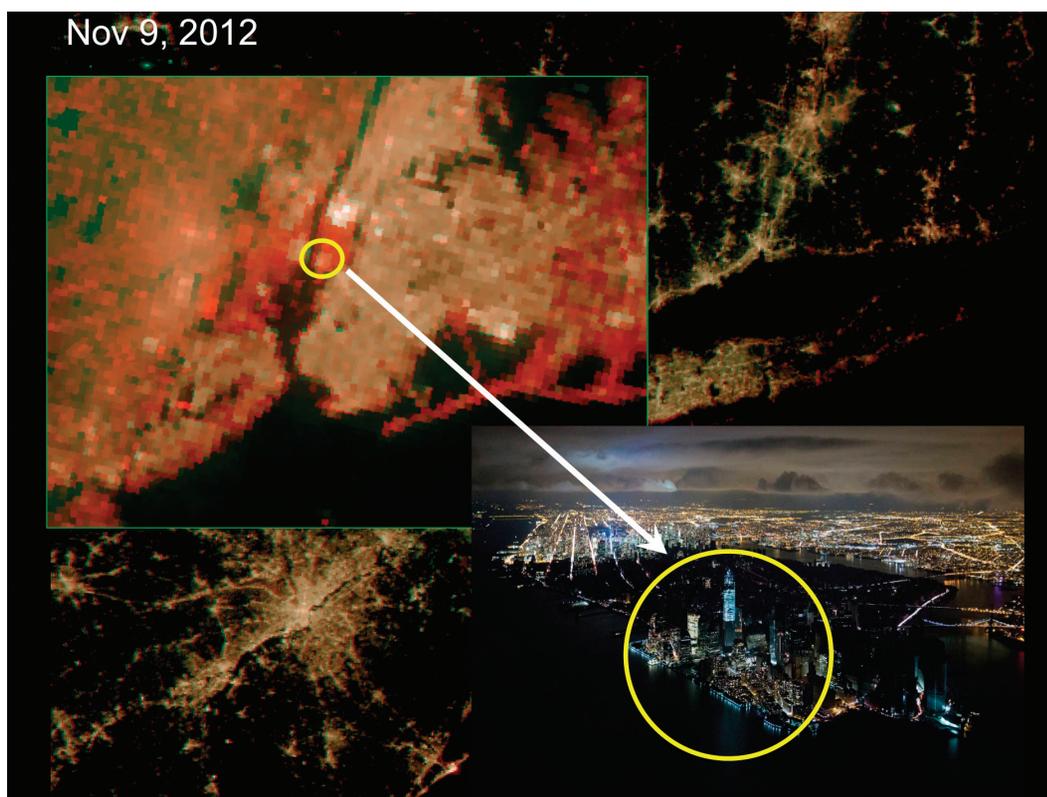


Рис. 7. Сравнение оперативных снимков Нью-Йорка со спутника в момент прохождения тайфуна Sandy ночью 9 ноября, аэрофотоснимка над центром города и карты ночных огней до тайфуна. В красном канале изображения - средняя яркость до тайфуна, в синем - яркость изображения со спутника сразу после тайфуна, в зеленом - карта облачности

изображения – средняя яркость до тайфуна, в синем – яркость изображения со спутника сразу после тайфуна, в зеленом – карта облачности. В результате сравнения заметна неравномерность подачи электроэнергии в центре города, которая подтверждается аэрофотоснимком. Сравнительный анализ изображений проводился экспертом вручную (Miller et al., 2013). Автоматизация детекции энергетических блэкаутов алгоритмически сложна и потребует существенных вычислительных ресурсов.

Разные авторы публикуют изображения изменений ночных огней, например, города Алеппо до и после конфликта, но это больше искусство в фотошопе, чем научные измерения. Радиометрическая калибровка детектора блэкаутов будет новым словом в ДЗЗ.

3. Детектирование источников горения методом VIIRS Nightfire

Для распознавания и описания «горячих точек» на ночной поверхности Земли алгоритм Nightfire использует весь инфракрасный диапазон электромагнитного излучения в пределах от 1 до 12 мкм. После запуска инфракрасного мультиспектрального радиометра VIIRS на спутнике Suomi NPP было замечено (Elvidge, Zhizhin et al., 2013), что в ночное время «горячие точки» видны в коротком ИК (SWIR) диапазоне с максимальным отношением «сигнал-шум». Разница в соотношении «сигнал-шум» между SWIR (каналы M7, M8 и M10) и MWIR (каналы M12 и M13) от газовых факелов в Ираке хорошо видна на *рис. 3*. На дневных изображениях в этом диапазоне сигнал с «горячих точек» перекрывается солнечным светом, и поэтому на SWIR-изображениях со средним разрешением ~1 км/пиксель они не распознаются. Этим объясняется то, что на протяжении 25 лет с момента публикации «классического» метода Дозиера в 1981 г. (Dozier, 1981), используемого с небольшими изменениями во всех алгоритмах ДЗЗ (Wooster et al., 2005) за исключением Nightfire, источники горения на поверхности Земли и днем и ночью ищутся в среднем ИК (MWIR) диапазоне. Однако в среднем ИК «горячие точки» всегда наблюдаются на тепловом фоне с поверхности Земли и облаков, что существенно влияет на чувствительность как по размеру, так и по температуре детектируемых источников горения.

Как видно на *рис. 3*, SWIR-каналы M7, M8 и M10 ночью содержат лишь тепловой шум сенсора и точечные сигналы от горячих источников на поверхности Земли. Поэтому в SWIR диапазоне можно использовать пороговый детектор полезного сигнала с условием, что порог детектирования плавно повышается от левого к правому краю изображения, следуя за нарастанием уровня теплового шума (Elvidge, Zhizhin et al., 2013). Специальный алгоритм для детектирования сигнала в среднем ИК-диапазоне должен выделять горячие точки на фоне температурных помех от более холодных рельефа, воды, облаков. Метод использует корреляцию значений в близких по длине волны каналах M12 и M13. Статья с описанием этого MWIR-детектора готовится в специальном выпуске по ночным огням для журнала Remote Sensing.

Если сигнал от источника горения детектируется (превышает уровень шума) сразу в нескольких спектральных каналах, то яркости в этих каналах дают форму ИК спектра, близкую к кривой Планка (Elvidge, Zhizhin et al., 2013), описывающую спектр теплового излучения абсолютно черного тела:

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

где B_{λ} – спектральная плотность излучения с поверхности черного тела, зависящая от длины волны λ ; T – абсолютная температура; k_B – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка и c – скорость света.

Приближение с помощью нелинейной регрессии спектров источников горения в форме кривой Планка дает в результате спектр серого тела εB_{λ} , который отличается от спектра абсолютно черного на масштабирующий множитель (коэффициент излучения $\varepsilon < 1$). Это объясняется тем, что размер источника горения (площадь поверхности 1~1000 кв. м) много меньше размера пикселя (~ 1 кв. км). Поэтому полученный в результате регрессии коэффициент излучения ε можно интерпретировать как отношение площади субпиксельного источника горения к площади содержащего его полного пикселя камеры на спутнике. Хотя за один проход спутника невозможно оценить положение источника горения точнее, чем размер пикселя (для VIIRS это квадрат $S_{pixel} = 750 \times 750$ кв. м), тем самым можно оценить его температуру T и площадь $S = \varepsilon S_{pixel} \ll S_{pixel}$.

Полная энергия излучения субпиксельного источника горения вычисляется по закону Стефана-Больцмана: $RH = \rho T^4 S$, где RH – энергия излучения (мВт), ρ – постоянная Стефана-Больцмана, T – температура источника (К), и S – его площадь (кв. м).

Высокая чувствительность алгоритма Nightfire при детектировании ИК источников горения на ночной поверхности Земли обуславливает большой объем точечных данных по результатам детекций. За одну ночь (земные сутки) алгоритм детектирует порядка 20 тыс. событий, которые можно условно разделить на «горячие» ($T > 1300K$, электрические огни и газовые факелы) и «теплые» ($400K < T < 1300K$, пожары, вулканы и высокотемпературные производства, например, плавильные или цементные печи).

Агрегация наблюдений из базы данных ИК-источников по пространству (например, по странам в пределах векторов политических границ и морских экономических зон) и по времени (например, суммарная энергия излучения повторяющихся источников за год) позволяет уточнить координаты источника (точность ~50 м) и при соответствующей калибровке делать выводы об объемах сжигания попутного газа и объемах добычи углеводородов (Elvidge et al., 2015b). Предварительная версия карты факелов сжигания ПНГ на территории России за период 2012–2016 гг. показана на *рис. 8*. На сегодня ДЗНПЗ факелов сжигания ПНГ является единственным инструментальным способом проверки соответствующей отчетности добывающих компаний и стран. В частности, эта методика

используется Всемирным Банком для оценки эффективности выполнения проекта Zero Routine Flaring by 2030⁴.



Рис. 8. Предварительная версия карты факелов сжигания ПНГ на территории России за период 2012–2016 гг.

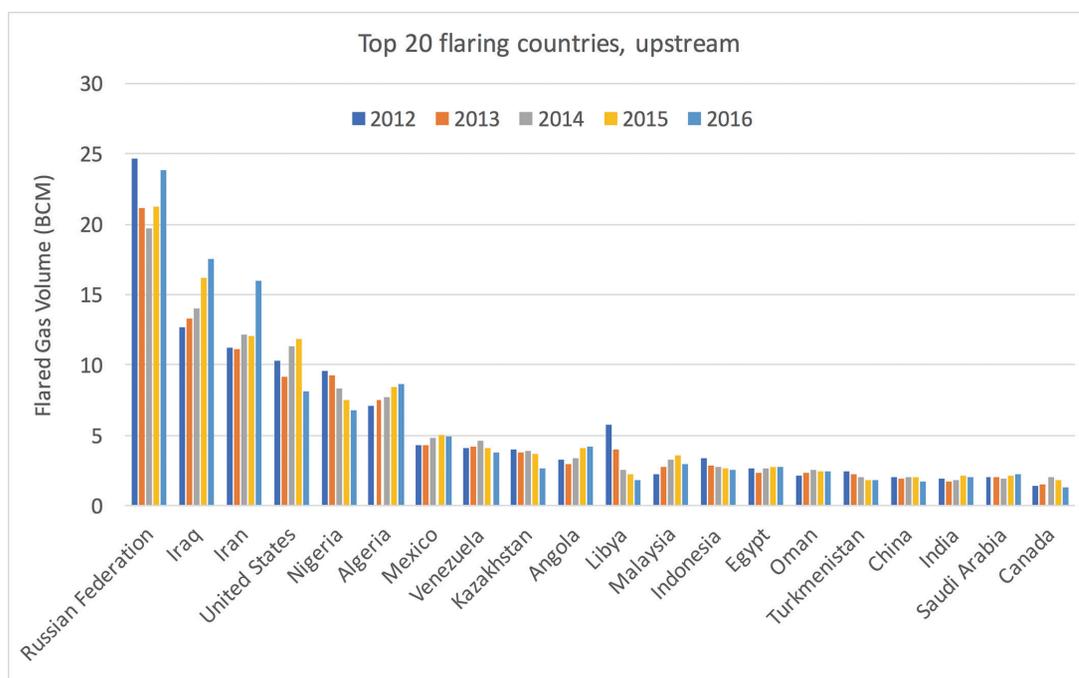


Рис. 9. Оценка Всемирным Банком объемов сжигания ПНГ (млн. куб. м) при добыче углеводородов по странам за 2013–2015 гг., полученная на основании данных ДЗНПЗ

⁴ <http://www.worldbank.org/en/programs/zero-routine-flaring-by-2030>

Методика оценки объемов сжигания по детекциям газовых факелов алгоритмом Nightfire была опубликована в работе (Elvidge et al., 2015b) и получила широкий резонанс в СМИ (Nature⁵, National Geographic⁶). Предварительные результаты за 2012–2016 гг. были представлены⁷ на съезде AGU 14 декабря 2016 г. На *рис. 9* показана гистограмма распределения объемов сжигания ПНГ по странам за 2013–2015 гг., опубликованная в пресс-релизе Всемирного Банка от 12 декабря 2016 г.⁸

4. Детектирование электрических огней от рыболовных судов и морских платформ методом VIIRS Boat Detector

Наибольшую сложность представляет задача детектирования и распознавания «полезного» сигнала на ночных снимках в видимом диапазоне в связи с разнообразием возможных источников сигнала. К настоящему времени заметно продвижение в задаче обнаружения электрических огней от рыболовных судов и морских платформ VIIRS Boat Detector (Elvidge et al., 2015a). В этой работе впервые реализован автоматический детектор изолированных ночных огней на поверхности моря в отсутствие лунной засветки. Пример изображения в канале DNB сенсора VIIRS, содержащего ночные огни от рыболовных судов, приводился ранее на *рис. 1*. Для выделения изолированных источников (ярких точек) в работе (Elvidge et al., 2015a) был разработан следующий пошаговый метод.

Шаг 1. Поиск изолированных ярких точек на изображении.

Используется высокочастотный пространственный фильтр в виде разности логарифма яркости изображения в видимом канале и результата применения к нему медианного фильтра в скользящем 3×3 окне. В автоматическом детекторе выбираются точки, для которых эта разность, называемая Spike Median Index (SMI), превышает заданный порог и которые одновременно являются локальными максимумами яркости.

Шаг 2. Фильтрация ярких точек по резкости.

Оценка локальной резкости изображений необходима в связи с тем, что в безлунные ночи облака не видны, а существующие методы детектирования облаков по инфракрасным снимкам плохо работают в областях со снежным покровом или покрытых тонкими или относительно теплыми облаками и аэрозолями (туманом или дымом).

В качестве меры локальной резкости используется метод спектральной резкости Sharpness Index (SI) (Vu, Phan, Chandler, 2012). Метод основан на наблюдении, что локально спектр Фурье в области изображения, не подверженной рассеянию в облаках и аэрозолях, и потому более резкой, будет медленнее затухать с ростом пространственной частоты по сравнению со спектром в области, покрытой облаками. Скорость убывания спектра

⁵ <http://www.nature.com/news/flaring-wastes-3-5-of-world-s-natural-gas-1.19141>

⁶ <http://news.nationalgeographic.com/energy/2016/01/150113-methane-aliso-canyon-leak-noaa-flaring-map/>

⁷ <https://agu.confex.com/agu/fm16/meetingapp.cgi/Paper/138796>

⁸ <http://www.worldbank.org/en/news/press-release/2016/12/12/new-data-reveals-uptick-in-global-gas-flaring>

$M(f)$ с ростом частоты f имеет тенденцию $M(f) \propto f^{-\alpha}$, что позволяет использовать степень убывания спектра $-\alpha$ в качестве показателя локальной резкости изображения, вычисляемой с помощью линейной регрессии $\log M(f) \sim -\alpha \log f$ в скользящем окне. На *рис. 10* показано изображение ночных огней от газовых факелов на морских платформах и рыболовных судов севернее Джакарты, полученное 27.09.2014 г. 18:34 UTC в канале DNB сенсора VIIRS, и соответствующая ему карта показателя локальной резкости SI, вычисленного в скользящем окне 32×32 пикселя. На нем видно, что в области изображения, размытого из-за дымовых шлейфов и облачности, спектр быстрее убывает с частотой.

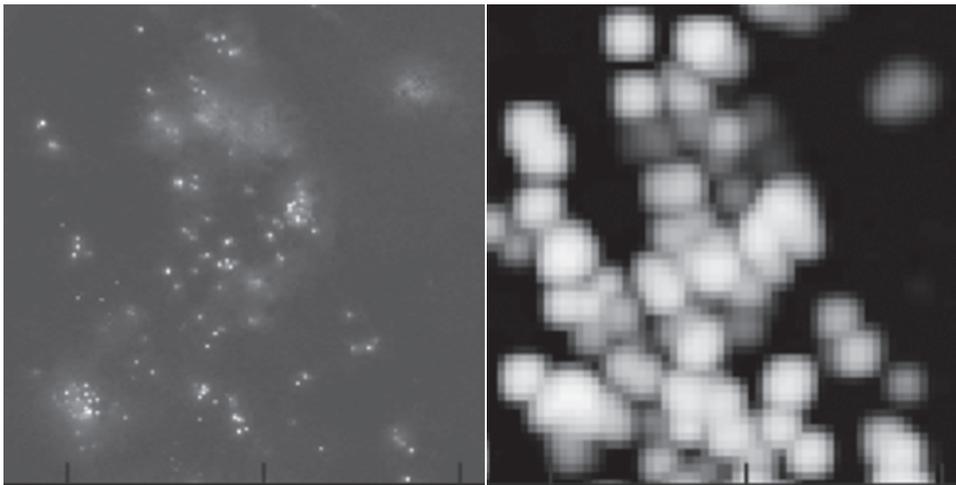


Рис. 10. Изображение ночных огней от поселений и дорог (слева), и соответствующая ему карта показателя локальной резкости SI (справа)

Шаг 3. Фильтрация по относительной яркости.

Вычисляется отношение яркости (Spike Height Index, SHI) между центральным пикселем и средней яркостью его ближайших соседей по строке и столбцу в изображении. «Спайк» (яркая точка, англ. spike) считается достаточно высоким, если это отношение больше заданного порога.

Шаг 4. Голосование по признакам

Если яркая точка на поверхности воды (необходима карта береговой линии высокой точности) удовлетворяет всем трем критериям, т.е. превышает пороги SMI, SI и SHI, то она относится к классу «судовые огни или морские платформы». Сравнение с результатом ИК-детектирования методом VIIRS Nightfire позволяет выделить отдельный подкласс огней от газовых факелов.

Используя алгоритм VIIRS Boat Detector, удалось построить систему оперативного обнаружения бортовых огней на рыболовных судах в Юго-Восточной Азии. Пример работы системы показан на *рис. 11*. На оперативной карте разными символами показаны положения рыболовных судов, морских платформ и газовых факелов, видимых со спутника NPP за одну ночь 1 декабря 2016 г.

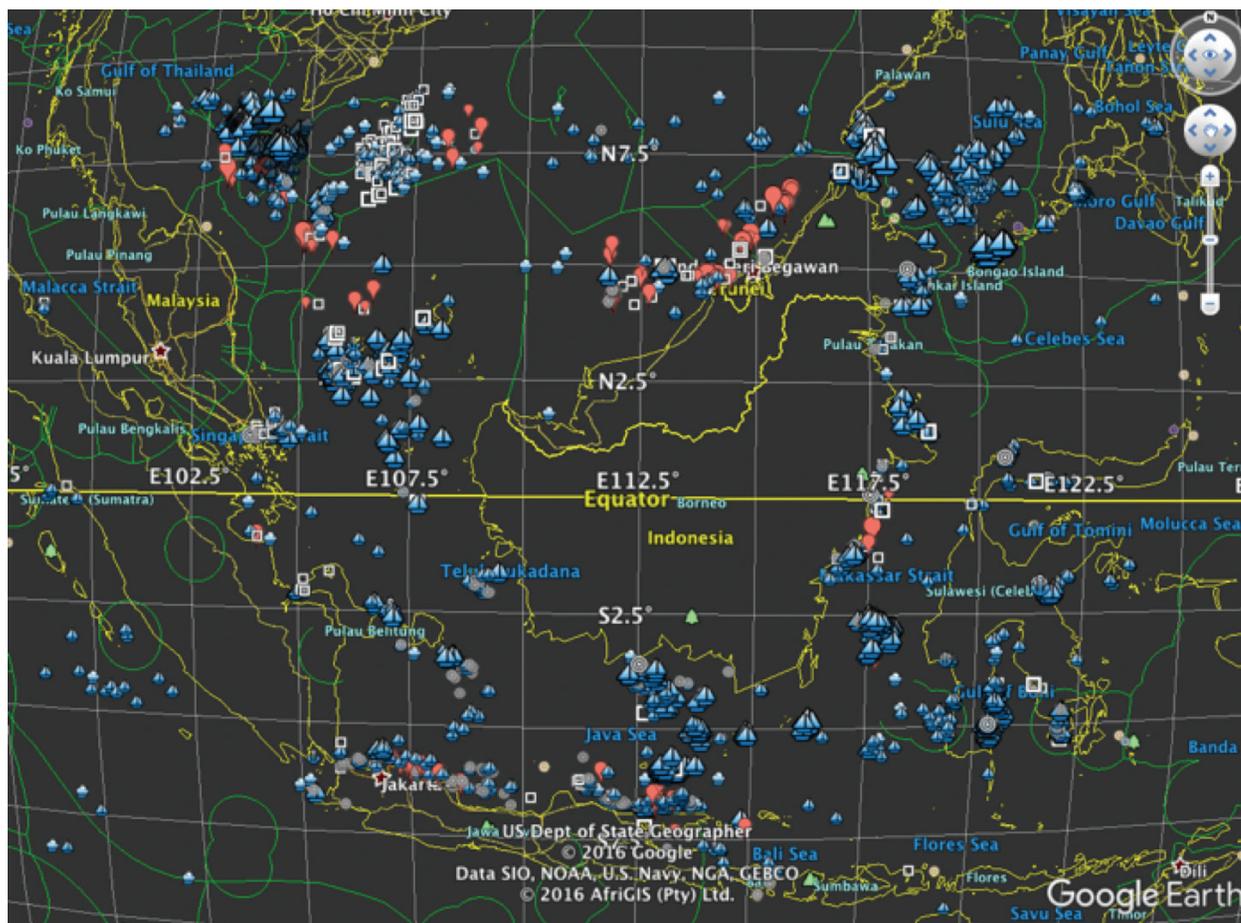


Рис. 11. Результат применения детектора изолированных ярких точек в видимом канале радиометра VIIRS для обнаружения корабельных огней в Юго-Восточной Азии. Данные за одну ночь 1 декабря 2016 г. Красным показаны газовые факелы, синим – рыболовные суда, белым квадратом – стационарные морские платформы

В отсутствии лунной засветки за ночь в этом регионе детектируется до 15 000 рыболовных судов. Большинство из них не оснащено системами спутникового мониторинга Vessel Monitoring Systems (VMS) и Automatic Identification System (AIS), поэтому обнаружение электрических огней на малотоннажных рыболовных судах является на сегодня единственным способом мониторинга эффективности рыболовных регулирующих норм и нагрузки на экосистему моря.

При высокой луне для детектирования огней от рыболовных судов необходима дополнительная фильтрация лунных бликов на поверхности волн и на кучевых облаках. Для фильтрации сигнала от освещенных луной облаков можно использовать корреляцию в скользящем окне между видимым DNB и ИК-каналами I04, I05 радиометра VIIRS. Метод фильтрации находится на этапе тестирования (VBD версии 2.3) и готовится к публикации статья с его описанием.

Заключение

Оперативный и ретроспективный анализ мультиспектральных изображений ночной поверхности Земли сопряжен с интенсивным сетевым обменом и обработкой больших объемов данных с помощью вычислительно сложных алгоритмов, накоплением результатов обработки в пространственно-временных базах данных, геостатистическим анализом и визуализацией больших изображений и детальных векторных карт с помощью сетевых картографических сервисов.

Объем «сырых» данных со спутника Suomi NPP с ночной стороны Земли за месяц составляет ~5 ТБ. Соответственно, ретроспективный анализ данных, накопленных за год по нескольким спутникам, потребует обработки набора из сотен тысяч файлов с петабайтным объемом. Результат детектирования ИК-источников за сутки обычно содержит 10–20 тыс. событий, каждое из которых характеризуется сотней параметров (координаты, время, яркости в спектральных каналах, оценки параметров ИК-источника, флаги качества и имена входных файлов данных). Пространственно-временная база данных (например, PostGIS) для анализа детекций за год будет содержать до 100 млн. записей.

Для обработки потока мультиспектральных спутниковых данных со скоростью, близкой к реальному времени (без накопления задержки), необходим параллельный вычислительный кластер с большим объемом оперативной памяти и дискового пространства на каждом узле. Используя кластер «стандартной» архитектуры из двенадцати 4-процессорных узлов, скорость ретроспективного анализа архива данных Suomi NPP лишь в три раза превышает скорость поступления новых данных. Это означает, что обработка всеми версиями алгоритмов потребует два года вычислений. Наиболее времяемкие алгоритмы – преобразование проекций, преобразования Фурье и вейвлетов, кросс-корреляция спектральных каналов.

Поэтому в 2016 году в Институте космических исследований РАН при поддержке Минобрнауки России был начат проект, целью которого является разработка технического задания по созданию специализированной многоядерной вычислительной платформы для большого массива данных (изображений), оптимизированной под массивно-параллельные алгоритмы обработки мультиспектральных космических снимков.

На территории России уже развернута целая сеть государственных, научных и коммерческих приемных станций для мультиспектральных данных с различных спутников. Сеть сбора данных совместно с системой долгосрочного хранения и параллельной обработки, создаваемой в ИКИ РАН, могут быть использованы для:

- создания каталога факелов сжигания попутного нефтяного газа и продуктов переработки углеводородов с возможностью оценки температуры и размеров факелов, а также динамики объемов сжигания по отдельным месторождениям и по всей территории РФ;
- создания каталога ночных огней на территории РФ с привязкой к географической инфраструктуре (населенные пункты, транспортные магистрали, технологические объекты);

– мониторинга судовых огней не только в области активного рыболовства, но и вдоль северного морского пути, и создания новых карт активного рыболовства и морского судоходства;

– мониторинга в реальном времени с высокой чувствительностью активного вулканизма на Дальнем Востоке и лесных пожаров в Сибири;

– оперативной поддержки принятия решений при чрезвычайных ситуациях, сопровождающихся энергетическим блэкаутом, подобных энергетической блокаде Крыма.

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

Литература

1. *Dozier J.* A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution // *Remote Sensing of Environment*. 1981. Vol. 11. P. 221–229.
2. *Elvidge C.D., Baugh K.E., Zhizhin M.N., Hsu F.C.* Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights // *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*. 2013. Vol. 35. P. 62–69. DOI: 10.7125/APAN.35.7.
3. *Elvidge C.D., Cinzano P., Pettit D.R., Arvesen J., Sutton P.C., Small C., Nemani R., Longcore T., Rich C., Safran J., Ebener S.* The Nightsat mission concept // *Int. J. Remote Sens.* 2007. Vol. 28. P. 2645–2670.
4. *Elvidge C., Hsu F.C., Baugh K.E., Ghosh T.* National Trends in Satellite Observed Lighting: 1992–2012 // *Global Urban Monitoring and Assessment Through Earth Observation*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014. P. 97–120. ISBN 9781466564497.
5. *Elvidge C.D., Zhizhin M.N., Baugh K.E., Hsu F.C.* Automatic Boat Identification System for VIIRS Low Light Imaging Data // *Remote Sens.* 2015a. Vol. 7. P. 3020–3036. DOI: 10.3390/rs70303020.
6. *Elvidge C.D., Zhizhin M.N., Baugh K.E., Hsu F.C., Ghosh T.* Methods for Global Survey of Natural Gas Flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Data // *Energies*. 2015b. Vol. 9. P. 1–15. DOI: 10.3390/en9010014.
7. *Elvidge C.D., Zhizhin M., Hsu F.C., Baugh K., Khomarudin M.R., Vetritya Y., Sofan P., Suwarsono, Hilman D.* Long-wave infrared identification of smoldering peat fires in Indonesia with nighttime Landsat data // *Environ. Res. Lett.* 2015c. Vol. 10 (6). P. 65002–65013. DOI: 10.1088/1748-9326/10/6/065002.
8. *Elvidge C.D., Zhizhin M.N., Hsu F.C., Baugh K.E.* VIIRS Nightfire: Satellite Pyrometry at Night // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 5. P. 4423–4449. DOI: 10.3390/rs5094423.
9. *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*. 2009. Vol. 2 (3). P. 595–622.
10. *Hsu F.C., Baugh K.E., Ghosh T., Zhizhin M.N., Elvidge C.D.* DMSP-OLS Radiance Calibrated Nighttime Lights Time Series with Intercalibration // *Remote Sens.* 2015. Vol. 7. P. 1855–1876. DOI: 10.3390/rs70201855.
11. *Huang Q., Yang X., Gao B., Yang Y., Zhao Y.* Application of DMSP/OLS Nighttime Light Images: A Meta-Analysis and a Systematic Literature Review // *Remote Sens.* 2014, Vol. 6, P. 6844–6866. DOI: 10.3390/rs6086844.
12. *Miller S.D., Straka W. III, Mills S.P., Elvidge C.D., Lee T.F., Solbrig J., Walther A., Heidinger A.K., Weiss S.C.* Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band // *Remote Sens.* 2013. Vol. 5. P. 6717–6766. DOI: 10.3390/rs5126717.
13. *Vu C.T., Phan T.D., Chandler D.M.* S3: A spectral and spatial measure of local perceived sharpness in natural images // *IEEE Trans. Image Process.* 2012. Vol. 21. P. 934–945.
14. *Witmer F., O’Loughlin J.* Detecting the effects of wars in the Caucasus regions of Russia and Georgia using radiometrically normalized DMSP-OLS nighttime lights imagery // *GISci. Remote Sens.* 2011. Vol. 48. P. 478–500.
15. *Wooster M.J., Roberts G., Perry G.L.W., Kaufman Y.J.* Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. P. 311. DOI: 10.1029/2005JD006018.

Multispectral nighttime remote sensing of the Earth

M.N. Zhizhin^{1,2,3}, C.D. Elvidge², A.A. Poyda^{4,3}

¹University of Colorado, Broomfield 80020, USA

E-mail: mikhail.zhizhin@colorado.edu

²NOAA National Centers for Environmental Information, Boulder 80305, USA

E-mail: chris.elvidge@noaa.gov

³Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

⁴National Research Center Kurchatov Institute, Moscow 123098, Russia

E-mail: poyda_aa@nrcki.ru

Modern low-orbiting and geostationary satellites are capable to observe the night side of the Earth in visible (0.4–1 μm) and multiple short/mid/long infrared bands (1–20 μm). Traditional applications for the nighttime multispectral remote sensing are cloud cover and biomass burning. Clouds and fires are observed both at day and night, thus the detection methods are made universal and as a consequence less sensitive to the light sources at night. The nighttime satellite observations have no contamination from solar light and provide a window of opportunities for a new class of specialized multispectral methods and applications. The most comprehensive sensor for the nighttime multispectral remote sensing is Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) onboard the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (Suomi NPP) spacecraft. The paper provides a review of the new applications for nighttime remote sensing and special methods for the satellite image processing. The new applications include mapping of the stable nighttime lights, detection of the natural gas flares, and monitoring of the nighttime fishing boats inside the marine protected areas.

Keywords: nighttime remote sensing, multispectral remote sensing, DMSL, VIIRS, city lights, gas flares, fishing boat lights

Accepted: 10.12.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-9-26

References

1. Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution, *Remote Sensing of Environment*, 1981, Vol. 11, pp. 221–229.
2. Elvidge C.D., Baugh K., Zhizhin M., Hsu F.C., Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights, *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 2013, V. 35, pp. 62–69. DOI: 10.7125/APAN.35.7.
3. Elvidge C.D., Cinzano P., Pettit, Arvessen J., Sutton P.C., Small C., Nemani R., Longcore T., Rich C., Safran J., Ebener S., The Nightsat mission concept, *Int. J. Remote Sens.*, 2007, Vol. 28, pp. 2645–2670.
4. Elvidge C., Hsu F.C., Baugh K.E., Ghosh T., National Trends in Satellite Observed Lighting: 1992–2012, In: *Global Urban Monitoring and Assessment Through Earth Observation*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014, pp. 97–120., ISBN 9781466564497.
5. Elvidge C.D., Zhizhin M., Baugh K., Hsu F.-C., Automatic Boat Identification System for VIIRS Low Light Imaging Data. *Remote Sens.*, 2015, Vol. 7, pp. 3020–3036. DOI: 10.3390/rs70303020.
6. Elvidge C.D., Zhizhin M., Baugh K., Hsu F.-C., Ghosh T., Methods for Global Survey of Natural Gas Flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Data, *Energies*, 2015. Vol. 9, pp. 1–15. DOI: 10.3390/en9010014.
7. Elvidge C.D., Zhizhin M., Hsu F.C., Baugh K., Khomarudin M.R., Vetruta Y., Sofan P., Suwarsono, Hilman D., Long-wave infrared identification of smoldering peat fires in Indonesia with nighttime Landsat data, *Environ. Res. Lett.*, 2015, Vol. 10 (6), pp. 6502–65013. DOI: 10.1088/1748-9326/10/6/065002.
8. Elvidge C.D., Zhizhin M., Hsu F.-C., Baugh K.E., VIIRS Nightfire: Satellite Pyrometry at Night, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 5, pp. 4423–4449. DOI: 10.3390/rs5094423.
9. 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*, 2009, Vol. 2 (3), pp. 595–622.
10. Hsu F.-C., Baugh K., Ghosh T., Zhizhin M., Elvidge C.D., DMSP-OLS Radiance Calibrated Nighttime Lights Time Series with Intercalibration, *Remote Sens.*, 2015, Vol. 7, pp. 1855–1876. DOI: 10.3390/rs70201855.
11. Huang Q., Yang X., Gao B., Yang Y., Zhao Y., Application of DMSP/OLS Nighttime Light Images: A Meta-Analysis and a Systematic Literature Review, *Remote Sens.*, 2014, Vol. 6, pp. 6844–6866. DOI: 10.3390/rs6086844.
12. Miller S.D., Straka W. III, Mills S.P., Elvidge C.D., Lee T.F., Solbrig J., Walther A., Heidinger A.K., Weiss S.C., Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band, *Remote Sens.*, 2013, Vol. 5, pp. 6717–6766. DOI: 10.3390/rs5126717.
13. Vu C.T., Phan T.D., Chandler D.M., S3: A spectral and spatial measure of local perceived sharpness in natural images, *IEEE Trans. Image Process*, 2012, Vol. 21, pp. 934–945.
14. Witmer F., O’Loughlin J., Detecting the effects of wars in the Caucasus regions of Russia and Georgia using radiometrically normalized DMSP-OLS nighttime lights imagery, *GISci. Remote Sens.*, 2011, Vol. 48, pp. 478–500.
15. Wooster M.J., Roberts G., Perry G.L.W., Kaufman Y.J., Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release, *Journal of Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, p. 311. DOI: 10.1029/2005JD006018.