

Ночные огни при определении и оценке социально-экономических процессов

А.В. Трусов, Д.Д. Ботвич, С.А. Маруев, С.Э. Виноградов

Ноябрь, 2020г.

Аннотация

Динамика ночных огней в видимом диапазоне спектра на суше в долгосрочной перспективе коррелирует с плотностью населения, ВВП и с технологическим прогрессом в целом. В настоящее время доступны большие массивы космических снимков, которые позволяют провести ретроспективный анализ этой корреляции за последние 30 лет. Зачастую это единственный надежный источник свежих данных, например, когда демографическая и экономическая статистика о регионах или устаревшая или просто недоступна. Тогда как из космоса можно регистрировать изменение ночной освещенности городов и, в частности, косвенно оценивать плотность населения и миграцию.

Содержание

1	Введение	3
2	Продукты обработки данных ночных огней	4
2.1	DMSP-OLS	4
2.2	Канал DNB сенсора VIIRS спутника Suomi NPP	7
3	Обработка и интерпретация данных для многовременного анализа	9
3.1	Обработка данных	9
3.2	Интерпретация данных	17
4	Инфографика и методы визуализации на основе ночных огней	19
4.1	Карты урбанизации	19
4.2	Карты урбанизации в динамике	20
4.3	Карты изменений между двумя годами	21
4.4	Карты трендов изменений ночных огней	24
5	Применение разновременных снимков ночных огней в рассмотрении социально-экономических процессов	25
5.1	Количественный мета-анализ	25
5.2	Урбанизация	30
5.3	Экономическое развитие и упадок	34
5.4	Изменение численности населения	37
5.5	Дополнительные социально-экономические показатели	40
6	Новые направления исследований	41
6.1	Понимание причин возникновения видимого из космоса света на поверхности Земли	41
6.2	VIIRS: новые предметы исследований, регионы, и временные интервалы	44
7	Заключение	45

1 Введение

В ночное время суток, антропогенная активность, например электрическое освещение в населенных пунктах, или газовые факелы на нефтяных месторождениях, освещают поверхность Земли. Эти ночные огни могут быть зафиксированы из космоса с помощью спутников, например, в рамках программы использования метеорологических спутников (DMSP-OLS) и их преемником, спутником Suomi NPP. DMSP-OLS представляет собой группу военно-метеорологических спутников, изначально спроектированную для наблюдения за облаками в ночное время суток. После рассекречивания программы в 1972 г., ученые осознали, что сенсор OLS способен фиксировать яркий свет, исходящий от городских огней, газовых факелов, рыболовецких судов, и других светящихся объектов [24].

Первоначально, социально-экономические области применения снимков ночных огней были весьма ограничены. В промежутке между концом 1970-х и началом 1990-х было опубликовано лишь несколько исследований с использованием подобных данных, например, исследования, посвященные городскому планированию ([24]; [70], плотности населения [137], и потреблению электроэнергии [125]. Систематические исследования с использованием ночных огней начались только с 1992 г., когда был создан цифровой архив данных программы DMSP-OLS (далее именуемой OLS), который теперь включает всю информацию, полученную в период с 1992 по 2013. Данные OLS, полученные до 1992 г., не имели цифровой версии (см. например [30]), и лишь некоторые исследователи использовали имевшиеся на тот момент дешифрованные пленки [11]. Данные с нового спутника Suomi NPP VIIRS (VIIRS), заменившего DMSP-OLS, доступны начиная с 1 декабря 2011 года.

В результате возникновения в 1992 г. цифрового архива OLS и появления композитных изображений «стабильных огней» для территории США в 1997 г., исследователи обнаружили возможность соотнести ночные огни с уже известными демографическими и экономическими переменными [31]; [62]. Благодаря этим корреляциям, ночные огни могут использоваться при прогнозировании переменных в местах, где нет достаточно надежных статистических данных, например, в приграничных или субнациональных регионах [57], поскольку ночные огни предоставляют глобальные по масштабу и продолжительные по времени оценки. В этой связи, космос и спутниковые снимки ночных огней открыли новую перспективу изучения взаимодействия человека и природы и объединили различные области знаний, в которых раньше разрозненно трудились экономисты, социологи и специалисты по дистанционному наблюдению.

Разнопрофильные и многовременные исследования, продолжавшиеся на протяжении практически двадцати лет, выявили тесные связи между ночными огнями и урбанизацией [56]; [92]; [107]; [141]; [142], изменением численности населения [31]; [110]; [126]; [127]; [148], и национальными и субнациональными оценками валового внутреннего продукта (ВВП) [26]; [29]; [129]; [128]. Запуск спутника Suomi NPP, выполненный совместно NASA и NOAA в октябре 2011, также ускорил прогресс исследований ночных огней. Его бортовой сенсор VIIRS оснащен высокочувствительным панхроматическим каналом DNB, который специально спроектирован для фиксирования огней

и отвечает запросам исследователей ночных огней [36]. Сенсор VIIRS может фиксировать ночные огни в более высоком пространственном и радиометрическом разрешении по сравнению со спутниками DMSP-OLS, и практически полностью устраняет некоторые проблемы, характерные для предыдущей программы спутников, включая насыщение, помутнение и отсутствие бортовой калибровки.

Учитывая все недавние достижения в области технологии дистанционного наблюдения за ночными огнями и их применении, стоит поговорить о предыдущих двадцати годах исследований социально-экономических процессов с помощью ночных огней, чтобы определить недостатки в текущих исследованиях и очертить направления для будущих изысканий. Кроме того, следует отметить важность использования разновременных снимков OLS и VIIRS, сделанных с целью определить, проконтролировать, и спрогнозировать социально-экономические процессы в различных пространственных и временных масштабах. Особое внимание должно уделяться разновременным снимкам ночных огней, поскольку, несмотря на то, что большинство исследований сконцентрированы на изучении снимков в рамках одного года, новейшие научные работы, включая только зарождающееся экономическое направление, изучают соотношения между разновременными снимками ночных огней и социально-экономическими процессами.

Данная работа организована следующим образом. Она содержит обзор разновременных массивов данных OLS и VIIRS (раздел 2), рассматривает основные методы обработки и корректировки этих данных (раздел 3). В разделе 4 рассматриваются инфографика и методы визуализации на основе данных ночных огней, а в разделе 5 приводится мета-анализ и разбор существующих исследований и их ограничений в области использования снимков ночных огней при определении и прогнозировании трендов урбанизации, экономических, и социальных процессов. Также содержится обзор перспективных направлений для будущих исследований (раздел 6) и заключение (раздел 7).

2 Продукты обработки данных ночных огней

2.1 DMSP-OLS

DMSP-OLS – это осциллирующий сканирующий радиометр с шириной обзора порядка 3000 км и двумя спектральными каналами: видимым ближним инфракрасным (VNIR), который фиксирует ночные огни, и тепловым инфракрасным. Система OLS состоит из двух телескопов и фотоумножительной трубки, которая может обнаруживать излучение в диапазоне между 0.47 и 0.95 микрометра (мкм) в видимой и ближней инфракрасной части спектра [91]. Система имеет режим «высокого» пространственного разрешения 0.56 км, но бортовое усреднение, выполняемое на квадратах размером 5 × 5, отправляет данные в центр управления в «сглаженном» разрешении 2.7 км. OLS облетает Землю 14 раз в сутки, обеспечивая глобальное и круглосуточное покрытие поверхности планеты [33]. Пролет в ночное время происходит примерно между 20:30

и 21:30 [34]. Значения данных передаются в форме шестибитных дискретных чисел в диапазоне от 0 (нет света) до 63 (максимальное количество света). Таким образом, значения OLS являются относительными, а не абсолютными показателями излучения. С 1992 г., в общей сложности 9 солнечно-синхронных спутников с полярной орбитой (название группы от F10 до F18) собирали данные OLS. Обычно два из этих спутников занимались единовременной отправкой цифровых данных. Для большей части наблюдений OLS, последующие спутниковые программы собрали достаточное количество дублирующих данных, чтобы открыть возможность взаимной калибровки различных сенсоров OLS. Данный способ обработки данных часто применяется в рамках долгосрочных исследований, поскольку OLS страдает от нехватки бортовой калибровки и калибровки между спутниками. Раздел 3.1.1 описывает этот метод.

Результаты обработки данных OLS варьируются от ежедневных снимков до годовых композитных снимков, которые компилируются силами NOAA/NGDC. Облака, солнце (особенно летом в полярных регионах), и луна могут помешать спутникам сфотографировать некоторые места на территории Земли. Облачные дни исключаются из годовых композитных снимков так же, как летние дни, во время которых солнечный свет препятствует обнаружению ночных огней на широтах вдали от экватора. Стоимость получения данных OLS также варьируется, например, композитное изображение ночных огней в рамках месяца стоит около \$7 тыс., в то время как годовые композитные снимки бесплатны. Дороговизна ежедневных и ежемесячных снимков является причиной того, что лишь немногие исследования рассматривают данные ночных огней во временных масштабах менее года, однако есть несколько исключений (например, [44]; [102]). Наиболее популярным результатом обработки данных ночных огней в рамках разновременных исследований ночных огней является глобальные годовые композитные снимки стабильных огней в период с 1992 по 2013 гг. [61], включающие четвертую версию (V4) серии снимков ночных огней.

Композитные снимки стабильных огней включают все постоянное освещение, а значение фонового шума равно 0. Кроме того, на них практически отсутствуют природные источники света, такие как солнце и луна, а также менее стабильные огни, например, полярное сияние или пожары [5]. Каждый композитный снимок повторно проецируется согласно первоначальной орбитальной системе координат, чтобы составить сетку с шагом 30 угловых секунд, охватывающую область от 180° западной до 180° восточной долготы и от 65° южной до 75° северной широты. Эта область включает большую часть обитаемой поверхности Земли за исключением отдаленных полярных регионов. Композитные снимки содержат огни от населенных пунктов, промышленных производств, пожаров, газовых факелов, и морских судов [28].

Четвертая версия снимков содержит годовые композитные изображения с параметрами «усредненные видимые огни» и «процент частоты обнаружения усредненных ночных огней». Параметр «усредненные видимые огни» усредняет дискретное число каждого пикселя на протяжении года без дополнительных фильтров. И хотя таким образом можно получить больше ненулевых значений пикселей, данный параметр добавляет некоторое количество фонового шума, что снижает точность оценок [21]. Параметр композитных снимков «процент частоты обнаружения усредненных

ночных огней» умножает усредненное дискретное число безоблачных наблюдений за ночными огнями в пределах каждого пикселя на процент частоты его обнаружения в течение года, т.е. значение дискретного числа, зафиксированного в течение 6 месяцев, будет уменьшено наполовину. Эти композитные снимки формируют основу для метода взаимной калибровки [37], но который достаточно редко используется в рамках исследований. Работа [96] является важным исключением, в результате которого было установлено, что, хотя параметры «усредненные видимые огни» и «стабильные огни» довольно схожи, они не так хороши при оценке численности населения и промышленной активности в сравнении с параметром «процент частоты обнаружения усредненных видимых огней». Хотя этот вывод не подкрепляется широким массивом данных, однако, стоит отметить, что композитные снимки с параметрами «усредненные видимые огни» и «стабильные огни» могут по-разному отражать промышленную активность.

Данные OLS часто характеризуются насыщением в ярких городских областях ввиду того, что их сбор происходит с высоким коэффициентом усиления. Так, на континентальной территории США, в зависимости от разграничения городских областей, до трети пикселей являются насыщенными с дискретным числом 63 [115]. Таким образом, массив данных, откалиброванный по яркости, разработанный в [33], является исключительно полезным при изучении изменений в городских областях. Данный параметр объединяет данные безоблачных наблюдений OLS, полученные за период 28 ночей в 1996 и 1997 с высоким, средним, и низким коэффициентом усиления, и позволяет определить уровень яркости различных областей в рамках городских поселений. Однако, как следствие этого, результаты, полученные на менее освещенных территориях, не имеют подобной точности. Массив данных, откалиброванный по яркости, все еще содержит относительные оценки ввиду отсутствия бортовой калибровки и корректировки разницы в настройках спутников [60]. Основываясь на работах [33] и [149], которые создали глобальное композитное изображение за 2006 г. скомбинировав данные с фиксированным коэффициентом усиления и данных о стабильных огнях с целью отразить наиболее низкие уровни ночных огней, в [60] скомпилировали 8 массивов данных, откалиброванных по яркости, за период с 1996 по 2011, используя как данные с фиксированным коэффициентом усиления, так и данные стабильных огней OLS, наблюдения за которыми производились с изменяющимся коэффициентом. К сожалению, невозможно скомпилировать массивы данных, откалиброванные по яркости, за 1992-1995, поскольку данные были собраны при низких настройках (низком коэффициенте усиления). Эти 8 композитных изображений взаимно откалиброваны, чтобы учесть разницу в настройках спутников и деградацию сенсоров и, следовательно, провести разновременное сравнение. Однако даже взаимно откалиброванные данные предоставляют только относительные оценки, а значит, их нельзя сравнивать с VIIRS напрямую. Одним из возможных вариантов сравнения и интегрирования данных OLS и VIIRS является радиометрическая калибровка данных OLS с использованием данных VIIRS [114]. Кроме того, в целях визуализации, тритемпоральные снимки OLS могут быть наложены на данные VIIRS для одновременной визуализации изменений огней, возникающих с течением времени, и более точной

оценки яркости [120].

2.2 Канал DNB сенсора VIIRS спутника Suomi NPP

Спутник Suomi NPP был запущен 28 октября 2011, на его борту содержится 5 сенсоров, наблюдающих за поверхностью Земли, включая сенсор VIIRS. Этот мультиспектральный сенсор имеет 22 канала, один из которых (DNB) фиксирует данные о ночных огнях и является самым инновационным из всех каналов VIIRS ([58]). Пространственное разрешение сенсора составляет 742 м, а ширина обзора 3040 км, что в 45 раз больше в надире и в 88 раз больше на краю сканирования по сравнению с OLS. Радиометрическое разрешение сенсора в 256 раз выше, а чувствительность к излучению в 10 раз больше, чем у предшественника [100]. Способность VIIRS фиксировать нижние уровни ночных огней с меньшими интервалами и спектральной чувствительностью 505-890 нанометров (нм) полной ширины на уровне половинной амплитуды (fwhm) [99] является серьезным достижением по сравнению с возможностями OLS. Для наглядности поясним, что высокое радиометрическое разрешение VIIRS позволяет ему различать наличие или отсутствие одной лампы уличного освещения на площади в 1 км² [113]. В то время как, сильная корреляция между данными OLS и наземными измерениями ночных огней уже давно продемонстрирована [71], предполагается, что данные VIIRS будут обладать еще более сильной корреляцией в этом отношении [65].

Несмотря на все вышесказанное, VIIRS не до конца соответствует специфическим требованиям, предъявляемым к спутнику, фиксирующему ночные огни со средним пространственным разрешением ~50 м и мультиспектральными каналами [36], поскольку DNB проводит сбор данных через один широкий спектральный канал. Кроме того, в некоторых аспектах OLS выглядит предпочтительнее VIIRS. Например, по мере того, как некоторые города переходят с натриевых ламп высокого давления на более энергоэффективное диодное освещение (LED), VIIRS будет ошибочно определять это как уменьшение интенсивности излучаемого света ввиду низкой чувствительности к длине волн менее 500 нм. Эта длина волн характерна для синей части спектра, где LED-лампы и выделяют существенное количество света [42]. Сенсоры OLS, чей диапазон чувствительности несколько шире (от 0.4 до 1.1 мкм), будут иметь больше шансов правильно определить LED излучение.

Данные VIIRS имеют 12- или 14-битное квантование в зависимости от уровня фонового шума. Настройки коэффициента усиления расширяют динамический диапазон определяемого излучения в дневное, сумеречное, и ночное время суток [99]. Пролет происходит около 1:30 ночи по местному времени ([38]), когда на поверхности Земли фиксируется гораздо меньше огней, чем в период времени 20:30–21:30, когда пролет происходит у OLS. Эту разницу необходимо держать в уме при сравнении данных, полученных с двух разных спутников.

Данные сенсора VIIRS, установленного на совместном спутнике NASA и NOAA, выложены в открытый доступ. Это позволяет проводить различные исследования с использованием разновременных снимков ночных огней, включая временные масшта-

бы менее года, которые в случае с данными DMSP-OLS, стоили больших денег. Частицы первичных необработанных данных VIIRS, включающие записи сенсорных данных и информацию о геолокации спутника, доступны на нескольких сайтах, включая сайты системы CLASS (<http://www.nsof.class.noaa.gov>) и сервера NASA в университете Висконсина (<http://sips.ssec.wisc.edu/>). Группа наблюдения поверхности Земли NOAA распространяет обработанные данные глобального и регионального уровня, включая снимки ночных огней сенсором VIIRS от 2012 г. и ежемесячную версию 1 (V1) композитных снимков ночных огней, полученных из канала DNB сенсора VIIRS. Как и композитные снимки OLS, снимки VIIRS охватывают область от 65° южной до 75° северной широты, однако они разделены на 6 географических сеток с шагом 15 угловых секунд и не поступают в виде одного файла формата GeoTIFF, содержащего полную картинку. Изображение ночных огней, датированное 2012, стало первым композитным снимком, не содержащим облаков, сделанным новым сенсором VIIRS. Выпущенный в 2013, он содержит наблюдения за ночными огнями при отсутствии лунного света в период с 18-26 апреля по 11-23 октября 2012. На данный момент похожих композитных снимков, которые позволили бы провести межгодовое сравнение, не существует.

Композитные снимки V1 OLS составляют картинку глобального излучения света на промежутке времени в один месяц. На этих снимках отсутствуют облачный покров, вспышки молний, и лунный свет [101]. Существует две конфигурации композитных снимком V1: первая, называемая «vcmcfg», исключает данные, запечатлевшие паразитный свет, попадающий на сканер сенсора; вторая, известная как «vcmslcfg», включает такие данные после того, как они прошли корректировку паразитного света согласно методу, описанному в работе [101]. Вторая конфигурация обладает худшим качеством, но содержит больше данных в районах, близких к полюсам. В случае с обеими конфигурациями, количество безоблачных наблюдений, использованных при формировании пикселя на месячном композитном изображении, представлено на отдельном снимке. Композитные снимки V1 VIIRS доступны за каждый месяц, начиная с апреля 2012. В отличие от композитных изображений стабильных огней V4 OLS, такие явления как полярное сияние, пожары, и другие краткосрочные источники света, включаются в композитные изображения V1 VIIRS, поскольку устойчивый метод их фильтрации на данный момент находится на стадии разработки (NOAA/NGDC, 2017b). Однако в сравнении с предыдущими спутниками, VIIRS, благодаря развитию соответствующих алгоритмов, более точно проводит различия между электрическим освещением и процессом горения ([38]), а также между облачным и снежным покровами и землей без снежного покрова [73].

Насыщение в случае с VIIRS также сильно уменьшено. VIIRS фиксирует как масштабные, так и небольшие пространственные колебания в антропогенном освещении, особенно в переходных зонах между городской и сельской территориями, а также в сугубо сельской местности, где данные OLS имеют склонность к насыщению ([95]). При сравнении снимков Нью-Йорка, очевидно, что VIIRS (рис. 3.1b) лучше отражает городскую структуру и связанность объектов посредством фиксации как мелких и тусклых огней, так и ярких огней без насыщения или ослабления [119]. На снимках

OLS (рис. 3.1a), город выглядит насыщенным и тускнеет в районе окружающих его рек. На снимке VIIRS можно рассмотреть более освещенные (например, центр) и менее освещенные (например, Центральный парк) пиксели в районе Манхэттена. Улучшенное оснащение VIIRS может быть полезным при изучении социально-экономических параметров и процессов на любой территории, от заснеженных околополярных районов до густонаселенных прибрежных городов.

3 Обработка и интерпретация данных для многовременного анализа

На основе данных о ночных огнях, особенно данных OLS, довольно сложно делать выводы ввиду трех основных особенностей спутника: отсутствие бортовой калибровки, помутнение, и насыщение [62]; [118]; [117]. В этом отношении, основную сложность на поверхности Земли для сенсоров представляют газовые факелы [37]. Следовательно, одновременный и поперечный анализ данных, полученных со снимков ночных огней, требует внесения определенных корректировок, которые рассматриваются в данном разделе. Мы также рассматриваем два наиболее распространенных способа интерпретации изменений в ночных огнях: изменения интенсивности света и изменения масштабов освещенности.

3.1 Обработка данных

Взаимная калибровка и фиксированные эффекты

С течением времени, рабочие характеристики спутников OLS меняются ввиду износа сенсора [142]. Также присутствует разница в данных, передаваемых разными спутниками OLS. Двумя основными способами уменьшить погрешности измерений, возникающие по причине межгодовой разницы между спутниками, являются взаимная калибровка [37] и фиксированные годовые эффекты [57]. Специалисты по дистанционному наблюдению чаще используют первый способ, в то время как экономисты в основном полагаются на второй способ при составлении моделей.

Взаимная калибровка представляется возможной, поскольку, в большинстве случаев, между любым спутником OLS и его сменщиком существует хотя бы один год, в течение которого их данные дублировали друг друга. Однако данный способ не может скорректировать тот факт, что, хотя время пролета для каждого спутника должно быть одинаковым каждый день и каждую ночь, фактическое время пролета может варьироваться в пределах двух часов между разными спутниками [37]. Это может привести к разнице в измерениях ночных огней ввиду постоянно изменяющихся условий на поверхности планеты. Используя композитные изображения с параметром «процент частоты обнаружения видимых огней», в [37] разработали наиболее популярный метод взаимной калибровки. Основываясь на предположении о том, что соотношение между ночными огнями за определенный заданный год и 1999 год является

квадратическим, обычная регрессионная модель наименьших квадратов используется при взаимной калибровке данных следующим образом:

$$DN_{\text{adjusted}} = C_0 + C_1 \times DN + C_2 \times DN^2, \quad (3.1)$$

где C_0 , C_1 и C_2 являются эмпирически измеренными коэффициентами (их значения указаны в работе [37]), DN – изначальное значение пикселя, а DN_{adjusted} – получившееся скорректированное значение пикселя. Все композитные изображения проходят взаимную калибровку, чтобы соответствовать значениям композитного изображения F12999, которое характеризуется наибольшими средними значениями DN . Для оценки коэффициентов взаимной калибровки, [37] использовали Сицилию в качестве контрольной области, поскольку ее ночные огни характеризуются полным набором значений и, по мнению исследователей, претерпели наименьшие изменения в течение последних лет. После взаимной калибровки, скорректированные значения пикселей на территории Сицилии практически не изменяются год к году. Другие исследователи модифицировали этот метод, переместив контрольную область на территорию, находящуюся в рамках изучаемой зоны, характеризующуюся наиболее стабильным освещением на протяжении длительного периода времени [89]; [107]. В [20] отмечается, что многие исследователи применяют метод взаимной калибровки для сравнения не композитных изображений с параметром «процент частоты обнаружения видимых огней», для которых изначально и создавался данный метод, а композитных изображений стабильных огней. Тем не менее, они протестировали метод взаимной калибровки, описанный в работе [37] на композитных изображениях стабильных огней, они пришли к выводу, что получившиеся результаты являются вполне удовлетворительными.

В качестве альтернативного метода калибровки композитных изображений DMSP-OLS, в работе [7] используется метод устойчивой регрессии под названием квантильная регрессия по медиане. По сравнению с методом из работы [37], основанного на данных OLS, этот метод менее подвержен влиянию резко выделяющихся наблюдений и основывается на предположении о том, что не менее 50% пикселей в пределах контрольной области (но не все из них) поддерживают постоянный уровень яркости освещения. Таким образом, квантильная регрессия по медиане может быть более подходящей для территорий с ограниченным направленным изменением освещения за продолжительный период времени [7]. В рамках этого метода взаимной калибровки, композитное изображение F101994 является базовым годом, поскольку оно обладает наибольшей долей пикселей с минимальными и максимальными значениями (0 и 63).

Большинство разновременных исследований направлено на изучение межгодовых изменений, однако, контроль сезонных факторов приносит ощутимую пользу при сравнении месячных композитных изображений. Для снижения влияния предсказуемых сезонных факторов, таких как изменения растительного покрова и лунного освещения, авторы [77] создали временной ряд на основе данных за 10 дней 1999-го года, накапливая максимальные значения дискретных чисел. Они расширили параметры применения фильтра снижения уровня шума, разработанного в [53] с целью подавить

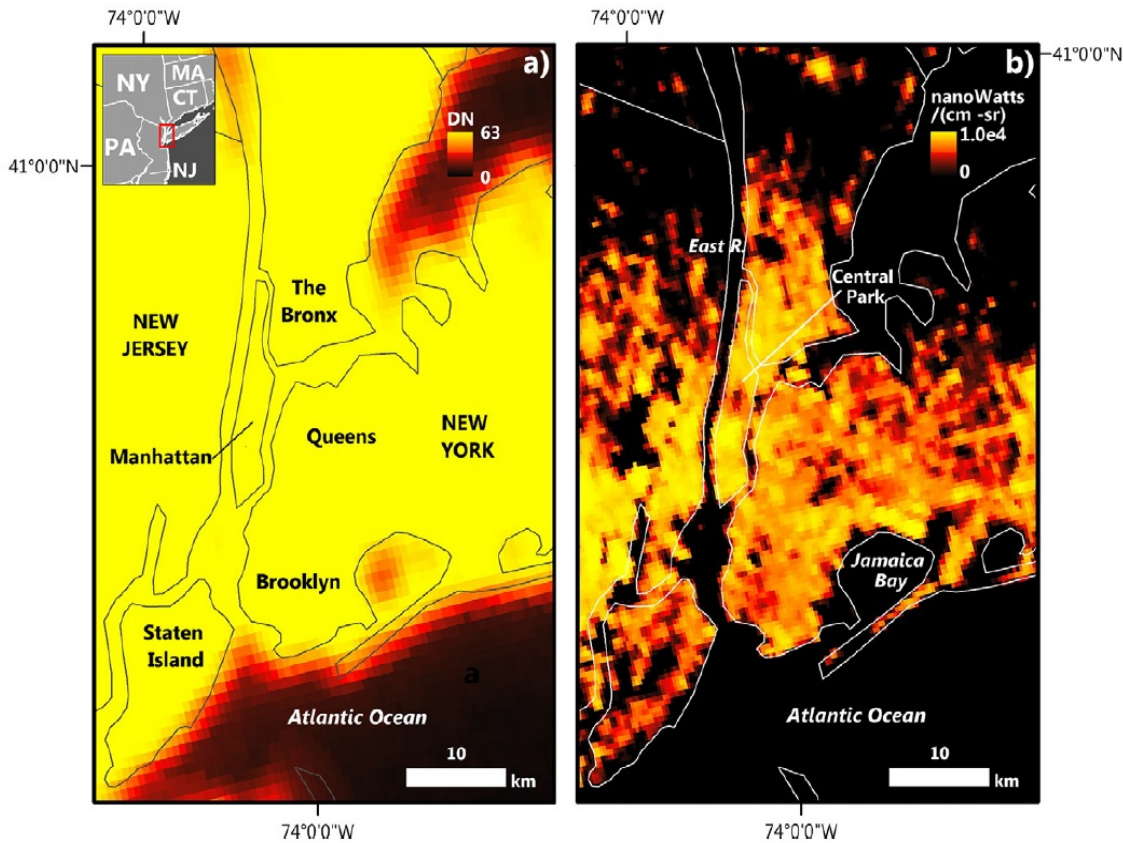


Рис. 3.1: а) Композитный снимок стабильных огней V4 OLS за 2013 г., Нью-Йорк и его окрестности. Насыщение и помутнение над водой ярко выражено. б) Версия 1 композитного снимка ночных огней, сделанного посредством DNB сенсора VIIRS за январь 2014. Отметим уменьшенное насыщение и помутнение и появившуюся возможность дифференцировать более темные (Центральный парк, Ист Ривер) и более яркие области на тех местах, которые на снимке OLS были насыщенными. Поскольку композитное изображение усредненных огней V4 OLS и композитное изображение огней, откалиброванных по яркости DMSP-OLS, выглядят практически так же, как композитное изображение стабильных огней, они не представлены на данном рисунке. Проекция карты: равновеликая проекция Ламберта для северной Америки.

сезонный периодический фоновый шум. Их метод также помогает избежать недооценки дискретных чисел, которая может возникнуть ввиду постоянного присутствия тонких облаков.

Многие экономисты, использующие данные о ночных огнях, отказываются от взаимной калибровки и вместо этого берут в расчет фиксированные годовые эффекты (см. например, [20], [21], [57]). Работа [57] ориентирована на использование огней в целях прогнозирования посредством получения регрессии роста уровня доходов в сравнении с ростом количества ночных огней. Они оценивают логарифмически-линейную

модель между «суммой огней» (стандартная оценка, принятая в научной литературе, которая складывает все значения дискретных чисел пикселей в заданной области, далее мы будем называть ее «SOL») для каждой страны и ее ВВП. Модель подразумевает структуру погрешности, которая включает фиксированные годовые эффекты, и может быть представлена следующим образом:

$$\tilde{e}_{jt} = c_j + d_t + e_{jt},$$

где \tilde{e} обозначает погрешность для страны j за год t , c_j – фиксированные страновые эффекты (учитывающие такие факторы как различия в принципах освещения и расходах на уличное освещение, которые не связаны с взаимной калибровкой), d_t – фиксированные годовые эффекты (учитывающие межгодовые отличия между спутниками и изменения в глобальных внешних условиях, например развитие технологий и экономическая активность), а e_{jt} – остаточная погрешность. В отличие от взаимной калибровки, которую можно применить к ночным данным саму по себе, контроль фиксированных эффектов требует наличие альтернативной количественной характеристики, например ВВП. Таким образом, этот метод бесполезен при изучении межгодовых трендов в ночных огнях, поскольку для них не доступны дополнительные данные. Например, взаимная калибровка будет более предпочтительным методом корректировки отличий между спутниками при необходимости создать карту, фиксирующую изменения ночных огней в отдаленной пустыне за период с 1992 по 2012 г.

Насыщение

Насыщение, иногда называемое топ-кодированием [57], является одним из основных недостатков данных OLS, поскольку они имеют только восьмибитное квантование и узкий динамический диапазон. Следовательно, сенсор не может оценить уровни яркости, находящиеся за пределами дискретного числа 63. Это представляет большую сложность в рамках исследований ярко освещенных городских центров, поскольку насыщение мешает обнаружению разных уровней освещения за пределами $DN=63$ [117].

Центры многих крупных городов в США, Восточной Азии, и Восточной Европы достигли насыщения, что не позволяет определять дальнейшее увеличение уровня яркости с помощью снимков OLS. В работе [94] зафиксировали 135 насыщенных городов только в материковой части Китая. Некоторые исследователи изучают разновременные снимки ночных огней без корректировки эффектов насыщения [19]. Это допустимо, если большинство источников освещения находятся ниже порога насыщения, как, например, в Индии [19] или Африке, где в период времени между 2007 и 2008 г. насыщенными были всего 0.00017% освещенных пикселей [97]. Однако исследования, которые пренебрегают корректировкой насыщения и используют ночные огни как непрерывную оценку без исключения насыщенных пикселей, следует оценивать критически.

Корректировки насыщения не являются необходимыми для исследований, определяющих пороговые значения ночных огней, но являются неотъемлемой частью иссле-

дований, использующих ночные огни как непрерывную оценку. При применении, корректировки насыщения могут повысить точность результатов в исследованиях долгосрочных социально-экономических трендов с использованием данных OLS [76]. Существует несколько методов их применения. В [110] предлагают вероятностную корректировку насыщения, согласно которой интенсивность ночных огней (дискретные числа) должна быть умножена на региональном уровне в среднем на 1.15 (в диапазоне от 1.0003 для «наименее развитых стран» до 1.570 для Японии, густонаселенной урбанизированной страны с серьезным насыщением), а на уровне квадрата сетки – в среднем на 1.23. В работе [75] установили, что при разрешении в 1 км² в пределах девяти зон, являющихся источниками электроэнергии на территории Японии, медианное суточное дискретное число линейно коррелирует с застроенными участками. Следовательно, они оценивают реальные значения насыщенных областей, используя уравнение кубической регрессии. Применение данной корректировки к насыщенному свету улучшает соответствие между стабильными огнями и потреблением электроэнергии в Японии и 12 других азиатских странах. Авторы [76] усовершенствовали этот метод, установив наличие сильной линейной корреляции ($R^2 = 0.93$) между суммой огней (SOL) ненасыщенных областей, как на снимках стабильных огней, так и на снимках, откалиброванных по яркости. Они получили функцию регрессии, точнее оценивающую реальные значения насыщенных пикселей. Этот новый метод значительно улучшил корреляцию между региональной суммой огней на снимках стабильных огней и уровнем годового потребления электроэнергии: значение R^2 , полученное с использованием метода из [75], увеличилось с 0.81 до 0.91. Наконец, после оценки двух региональных уровней и двух методов корректировки насыщения на уровне пикселей, в [94] пришли к выводу, что метод корректировки необходимо выбирать в зависимости от изучаемой территории. Методы, рассматривающие данные на уровне регионов, подходят для корректировки данных в областях с большим количеством насыщенных пикселей, в то время как методы, рассматривающие данные на уровне пикселей, лучше подходят для областей с небольшим количеством насыщенных пикселей.

Помутнение

Помутнение (также именуемое пространственным размытием или засветом) происходит, когда усреднение соседних входных квадратов сетки приводит к тому, что освещенные пиксели выходят за пределы зоны, реально освещенной определенным источником света. Этот феномен особенно часто встречается на снимках OLS [115] и выражен наиболее ярко на участках, занятых водой, или покрытых снегом, поскольку они отражают находящиеся поблизости огни лучше, чем темная земля. Сорок процентов крупных городов планеты с населением от 1 до 10 миллионов человек расположены вблизи береговых линий [133]. Поскольку города часто представляют интерес для исследований, рассматривающих ночные огни, помутнение должно в обязательном порядке приниматься во внимание при изучении прибрежных мегаполисов, хотя помутнение может иметь место и на отдаленной от воды местности. Отсутствие кор-

ректировки помутнения при использовании ночных огней в качестве косвенного показателя может привести к переоценке таких параметров, как степень урбанизации, поскольку изменения в уровне яркости будут иметь большую площадь в сравнении с сопоставимыми изменениями земного покрова [119]. Как правило, помутнение пропорционально сумме огней, исходящих от определенного источника света, например, городской территории. Например, В работе [134] обнаружили сильную корреляцию между суммой городских огней и их распространением за пределы береговой линии на примере девяти прибрежных городов в Австралии ($R^2 = 0.89$).

Нет единого мнения касательно того, как необходимо корректировать помутнение. Определение порогового значения, как на основании частоты определения, так и на основании фиксированного значения дискретного числа (DN), может уменьшить эффект помутнения и является наиболее часто применимым методом корректировки. Однако, существует множество точек зрения на то, как именно необходимо применять данный метод [144]. На основе изучения городских территорий в США, авторы [62] приходят к выводу, что порог частоты обнаружения, фильтрующий пиксели, которые были освещены в 89% всех орбитальных пролетов, отраженных на композитном снимке стабильных огней DMSP-OLS за период 1994/1995 годов, не только позволяет очертить границы города точнее, чем данные о городском населении, приведенные в переписи населения в США за 1990 г., но и устраняет эффект помутнения. Показывая, как пороговые значения варьируются от города к городу, в работе [56] утверждают, что на снимках стабильных огней Пекина, Лхасы, и Сан-Франциско пороговые значения определяются наиболее точно на уровнях частоты обнаружения, равных 97%, 88%, и 92% соответственно. Придерживаясь иного мнения касательно эффективности единого порогового значения, равного 89%, в работах [62], [117] изучили 17 городов по всему миру за периоды 1992/1993 и 1994/1995, а также массивы данных о стабильных огнях за 2000 г., и пришли к выводу, что ни одно пороговое значение не имеет пространственной протяженности, соответствующей степени застройки, обнаруженной на основе данных спутника Ландсат. Они предложили использовать процедуру корректировки помутнения в зависимости от масштаба, которая принимает во внимание размер освещенной области. Они задали линейное соотношение между освещенной областью и степенью помутнения для 10 освещенных островов и пришли к выводу, что корректировка помутнения, зависящая от масштаба, может оказаться эффективной. Однако дальнейшие исследования эффективности данного метода отсутствуют, и нельзя утверждать, что он будет также полезен для прибрежных областей. Наконец, модель устранения засвета (ORM), разработанная в [134], изучает влияние метеорологических условий на отрезке в один год, топографии, высоты над уровнем моря, и отличий в осветительных технологиях на уровне регионов на масштаб и степень воздействия помутнения. Однако поскольку данная информация доступна не всегда, особенно в регионах развивающихся стран, где применение снимков ночных огней могло бы дать наибольший эффект, область применения модели устранения засвета (ORM) ограничена.

Ввиду сложностей, возникающих из-за помутнения и необходимости интерпретировать очень низкие значения дискретных чисел, выбор порогового значения может

существенно повлиять на результат многих исследований ночных огней в зависимости от того, измеряют ли они интенсивность или масштаб огней. Как и в случае с единым стандартом порогового значения частоты обнаружения, необходимого для разграничения городских территорий, у исследователей нет консенсуса касательно единого стандарта порогового значения дискретного числа. Показывая разнообразность пороговых значений дискретных чисел, использованных в различных исследованиях ночных огней, авторы [140] используют значение $DN > 10$, чтобы очертить границы городских территорий в Китае, а в [3] используют значение $DN > 30$ для очерчивания границ городских территорий в Бразильской Амазонии. Используя массив данных о земном покрове в высоком разрешении при процессе проверки, в [144] установили, что оптимальное пороговое значение дискретного числа для очерчивания границ больших городских кластеров, таких как Бостон или Пекин, составляет 60, а в менее крупных городах – 20. Оптимальные пороговые значения для разграничения освещенной городской территории могут варьироваться как в рамках одной страны, так и с течением времени [47]. Авторы [118] полагают, что пространственная протяженность и интенсивность развития, продемонстрированные посредством ночных огней, являются непрерывными, а не дискретными по своей природе, и отражают отличные друг от друга пространственные фазовые переходы. По мере того, как пороговое значение увеличивается с 3 до 60, сети освещенных областей распадаются на фрагменты и сжимаются ввиду исключения менее ярких огней, соединяющих отдельные участки. Уменьшение очерченных освещенных зон при пороговом значении $DN = 8$ говорит как о высокой чувствительности к разграничению освещенных областей при низких пороговых значениях дискретных чисел ($DN < 8$), так и о резком снижении глобального распределения частоты огней при пороговом значении дискретного числа, близкого к 8. Принимая во внимание диапазон гипотетических пороговых значений, исследователям, использующим пороговое значение в качестве метода анализа, следует обозначить уровень чувствительности результатов к изменениям в пороговом значении.

Данные VIIRS не демонстрируют практически никакого помутнения в сравнении с данными OLS, а, следовательно, не требуют практически никакой корректировки. В рамках одного из немногих исследований, сравнивающих помутнение в данных VIIRS и OLS, в [115] нормализуют снимки из каждого массива данных (композиционные изображения V4 OLS за 2012 г. и двухмесячные композиционные изображения VIIRS за 2012 г.), используя линейное растяжение, чтобы сделать их сопоставимыми. Они пришли к выводу, что для вычленения из двух разных изображений городской территории одинакового размера требуется 4000 непрерывно горящих огней в случае со снимком OLS и 23000 огней для снимка VIIRS. Это объясняется тем, что данные VIIRS фрагментируют большие городские территории и фиксируют дополнительные небольшие городские участки. Насыщение или помутнение может повлиять на разрешение таких объектов на снимках OLS. Благодаря уменьшению эффекта помутнения, снимки VIIRS отражают ярко освещенные прибрежные городские агломерации, например, на северо-востоке США, в виде сети взаимосвязанных городов, а не одного большого пятна света, как это происходит на снимках OLS [106].

В то же время, более высокая чувствительность VIIRS позволяет зафиксировать ночное свечение атмосферы, т.е. свет, исходящий от ионосферы Земли ([38]). OLS не способен зафиксировать это свечение ввиду более низкой чувствительности сенсоров [99]. Поскольку интенсивность свечения варьируется на разных участках поверхности Земли, авторы [72] отмечают, что эти вариации необходимо принимать во внимание при создании изображений стабильных огней на основе данных канала DNB сенсора VIIRS. В противном случае, некоторые регионы, характеризующиеся более ярким свечением атмосферы на постоянной основе, будут казаться ярче, чем они есть на самом деле. Эти неточности, в свою очередь, могут привести к снижению точности прогнозов социально-экономических переменных, основанных на данных о ночных огнях в глобальном масштабе.

Газовые факелы

Сжигание попутного газа в факелах – отраслевая практика, связанная с процессом сжигания в местах нефтедобычи газа, который экономически нецелесообразно выводить на рынок. И хотя композитные изображения стабильных огней V4 OLS содержат газовые факелы, их следует исключать на стадии обработки снимков, поскольку они могут повлиять на оценку социально-экономических переменных. Их сохранение на снимках оправдано только в случае, если исследование посвящено изучению феномена газовых факелов [37]. Газовые факелы также могут использоваться при аппроксимации выбросов углерода [25]; [106], однако во многих других исследованиях, посвященных, например, оценкам численности населения, использование данных о сжигании попутного газа может привести к неточностям в результатах. Например, проведение исследования с целью спрогнозировать рост экономики или населения в Нигерии с использованием данных об изменениях ночных огней будет серьезно осложнено, поскольку эта страна также является одной из крупнейших по объему сжигаемого газа, а значит, имеющиеся газовые факелы будут затруднять правильную оценку ночных огней. Первые попытки, нацеленные на обнаружение и борьбу со сжиганием попутного газа, были предприняты в 2003, когда Всемирный банк организовал Глобальное партнерство по сокращению сжигания газа. Поскольку статистика нефте- и газодобывающих компаний касательно объемов сжигаемого газа не является надежным источником информации, Всемирный банк и NOAA совместными усилиями провели первое глобальное исследование сжигания попутного газа в факелах на основе спутниковых наблюдений и с использованием снимков OLS за период с 1995 по 2006 годы (Всемирный банк, 2011:8). Их проект привел к созданию силами NOAA/NGDC глобальных географических шейп-файлов, посвященных сжиганию газа на нефтяных месторождениях. Эти файлы содержат большинство газовых факелов на момент 2008 года (http://ngdc.noaa.gov/eog/interest/gas_flares_countries_shapefiles.html) и могут быть использованы для их вычленения из среды стабильных огней. Однако, некоторые области, которые в действительности отражают реальное антропогенное освещение, также попали в вышеупомянутые полигоны, характеризующиеся наличием газовых факелов [17]; [57] установили, что в границах данных территорий проживает 0.3% от

общего населения Земли. В этой связи, открытым остается вопрос, нужно ли использовать шейп-файлы NOAA/NGDC (которые изначально были созданы для работы с данными OLS) с данными VIIRS, учитывая более высокое пространственное разрешение данного сенсора и время, которое прошло с момента создания этих файлов. В целом, несмотря на то, что наличие газовых факелов подразумевает проведение корректировки в рамках исследований с использованием данных VIIRS, оценивающих рост населения или другие переменные, не связанные со сжиганием попутного газа, необходимость проведения взаимной калибровки и корректировок помутнения и насыщения практически отпала.

3.2 Интерпретация данных

Изменения интенсивности и масштабов ночных огней

Изменения в ночных огнях могут быть результатом реального увеличения или уменьшения объема искусственного освещения, которое, в свою очередь, связано с такими переменными, как численность населения или ВВП. По этой причине, они являются полезным косвенным показателем в социально-экономических исследованиях. На уровне пикселей, ночные огни представлены дискретным числом в данных OLS и реальной яркостью на снимках VIIRS. На более крупных масштабах, общая интенсивность ночных огней представлена в виде суммы огней (SOL). Среди производных от этого показателя: средняя (а не общая) сумма огней на конкретной площади, сумма огней на душу населения, и взвешенная освещенная область. Последний параметр также называют «сумма площадей освещенных пикселей, умноженная на нормализованное значение дискретного числа» ([92]). Масштаб ночных огней зачастую представлен в виде общей площади, находящейся выше или ниже определенного порогового значения. Выбор порогового значения может серьезно повлиять на полученные результаты.

И хотя интенсивность и масштаб ночных огней при определенных обстоятельствах могут расти параллельно, факторы, влияющие на один показатель, не всегда влияют и на другой. Так, интенсивность огней может увеличиваться и без увеличения их масштаба, и наоборот. Следовательно, выбор того или иного показателя также может повлиять на результаты. Например, очерчивание изменения городской территории на основании изменения масштаба освещенной области поможет обнаружить города, расширившие свою площадь. Для сравнения, оценка изменения городской территории на основании пикселей с увеличившейся яркостью скорее поможет зафиксировать города, которые растут вверх, т.е. увеличивают плотность населения. Кроме того, необходимо иметь в виду, что изменения в ночных огнях могут быть вызваны изменениями цвета, типа, или спектра используемого освещения. В работе [7] выделили несколько европейских областей, в которых уменьшение объема исходящего света объясняется не спадом экономической активности, а сознательной политикой по экономии электроэнергии.

Некоторые исследования используют параметр освещенности области в той или

иной форме [27]; ([31], [32]); [129]. Данный показатель может быть полезным при простой оценке наличия или отсутствия ночных огней, например, в рамках исследований, посвященных изучению вопроса доступа к электроэнергии [27]. Однако большинство исследований используют сумму огней при оценке изменений ночных огней. В исследовании, рассматривающем 35 городов на территории Китая с использованием снимка DMSP-OLS за 1996/1997 г., откалиброванного по яркости, Ло (2002) установил, что сумма огней имеет более сильную корреляцию с количеством неаграрного населения, чем показатель освещенности области ($R^2 = 0.91$ против $R^2 = 0.78$), показатель ВВП ($R^2 = 0.91$ против $R^2 = 0.70$), площадь застройки ($R^2 = 0.91$ против $R^2 = 0.84$), и потребление электроэнергии ($R^2 = 0.91$ против $R^2 = 0.77$). И хотя сумма огней может оказаться более предпочтительным выбором при измерении социально-экономических переменных, в определенных обстоятельствах, особенно в насыщенных областях, оценки, полученные на основе показателя освещенности области, могут быть более точными. На основе четырех проведенных исследований в масштабах стран, авторы [129] утверждают, что более сложный пространственно-аналитический подход, сочетающий показатель освещенности области и данные о населении, предоставляет более точные оценки регионального ВВП, чем суммирование ночных огней (Китай: $R^2 = 0.96$ против 0.94; Индия: $R^2 = 0.84$ против 0.70; Турция: $R^2 = 0.95$ против 0.58; США: $R^2 = 0.72$ против 0.70).

Пространственный масштаб

При оценке социально-экономических параметров на основе снимков ночных огней, необходимо уделять внимание пространственному масштабу. Основную сложность в этой связи представляет проблема изменяющейся пространственной единицы, которая имеет место при получении разных результатов в процессе анализа одних и тех же данных либо с изменяющимся пространственным разрешением (эффект масштаба), либо с сохранением масштаба, но с изменением границ разных зон (эффект зонирования) [26]. Эффекты масштаба могут привести к экологической ошибке, когда исследователи делают неверные выводы о мелкомасштабных процессах на основе данных с низким разрешением. Например, тот факт, что среднее значение ночных огней в Калифорнии выше, чем в Неваде, не означает, что Лос-Анджелес или Сан-Франциско будут априори в среднем ярче, чем Лас-Вегас.

Несмотря на то, что некоторые исследования рассматривают ночные огни через призму масштабов [26]; [45]; [47]; ([93]); [117], вариации соотношений в зависимости от масштаба не всегда изучаются должным образом. В работе [47] установили, что в период с 1992 по 2012, значения R^2 между составным индексом урбанизации и составным индексом ночных огней (среднее значение дискретного числа всех пикселей в заданной пространственной единице на территории Китая, умноженное на соотношение городской территории в рамках заданной пространственной единицы к ее общей площади) равны 0.96 на уровне страны, 0.71 на уровне провинций, и 0.69 на уровне уездов. Они предполагают, что очерчивание городской освещенной области посредством определения порогового значения на крупном масштабе, например, региона (находя-

щимся между национальным и провинциальным уровнем) может служить причиной более слабых корреляций, обнаруженных на меньших масштабах. Ночные огни не всегда хорошо коррелируют с социально-экономическими данными на более крупных масштабах, однако Форбс (2013) установил, что в США сумма огней и показатель ВВП имеют более сильную корреляцию на уровне мегаполисов, чем на уровне штатов. Чтобы лучше понять эффект масштаба, Форбс (2013) предлагает изучить процессы, влияющие на соотношение между ночными огнями и социально-экономическими данными на разных масштабах и с течением времени вместо того, чтобы концентрировать внимание на корреляциях на едином масштабе и единых временных отрезках.

4 Инфографика и методы визуализации на основе ночных огней

Следует сразу отметить, что "необработанные" ночные огни визуально тоже представляют некоторый интерес. Ниже показан пример "необработанных" ночных огней (см. рисунок 4.1). Заметим, что в необработанном виде (т.е. в оригинальном представлении) ночные огни не очень информативны и визуально не очень интересны.

В качестве примера мы рассмотрим следующие виды инфографики:

- карты урбанизации;
- карты урбанизации в динамике;
- карты изменений между двумя годами;
- карты трендов ночных огней.

Все упомянутые виды инфографики имеют естественную географическую привязку используя соответствующую географическую привязку данных ночных огней.

4.1 Карты урбанизации

Достаточно простым, но весьма эффективным методом визуализации являются так называемы карты урбанизации. Для первого примера мы здесь рассмотрим некоторый условный Московский Регион, включающий Москву, Московскую область и несколько прилегающих областных центров.

Ниже показаны примеры карты урбанизации (Рисунок 4.2). Заметим, что в необработанном виде (т.е. в оригинальном представлении) ночные огни не очень информативны.

Подобные методы визуализации применимы и к большим регионам, например, включающий Москву и Санкт-Петербург (см. рисунок 4.3).

Более того, можно сгенерировать и карты урбанизации на гораздо большем пространстве. Например, ниже приведена карта Европы вместе с частью РФ в 2000 году (см. рисунок 4.4).

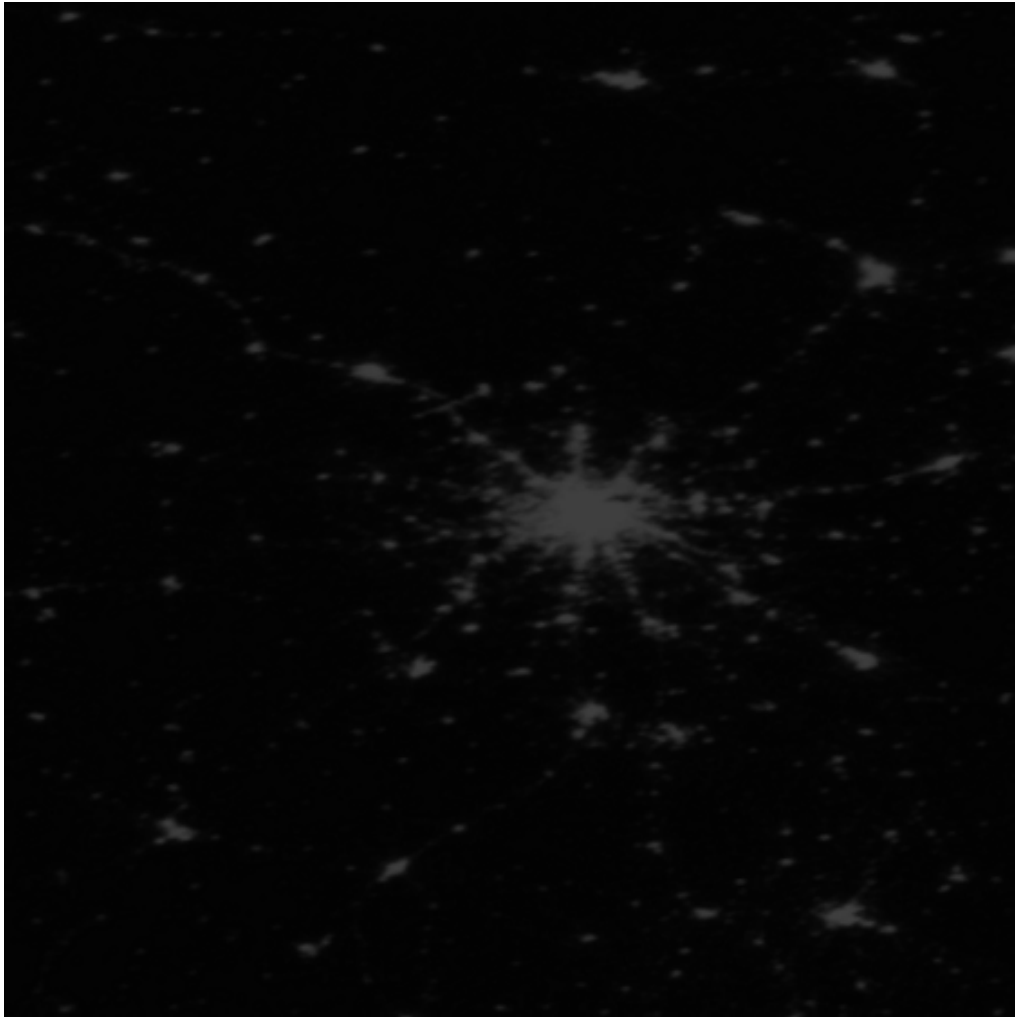


Рис. 4.1: Ночные огни в Московском регионе в 2008 году.

4.2 Карты урбанизации в динамике

На рисунке 4.5 ниже показаны изменения на карте урбанизации Московского Региона за период с 1992 по 2013.

Такой визуальный анализ динамики урбанизации, естественно, не привязан к очень большим городам (например, Москва, Санкт-Петербург, Свердловск и т.д.), а может быть применен и к меньшим областным центрам (Курск, Калуга, и т.д.), и к районным центрам и даже достаточно большим поселкам, или, наоборот, к целым странам и континентам.

Отметим, что подобные методы визуализации были использованы, например, в работах исследователей из Индии и Китая.

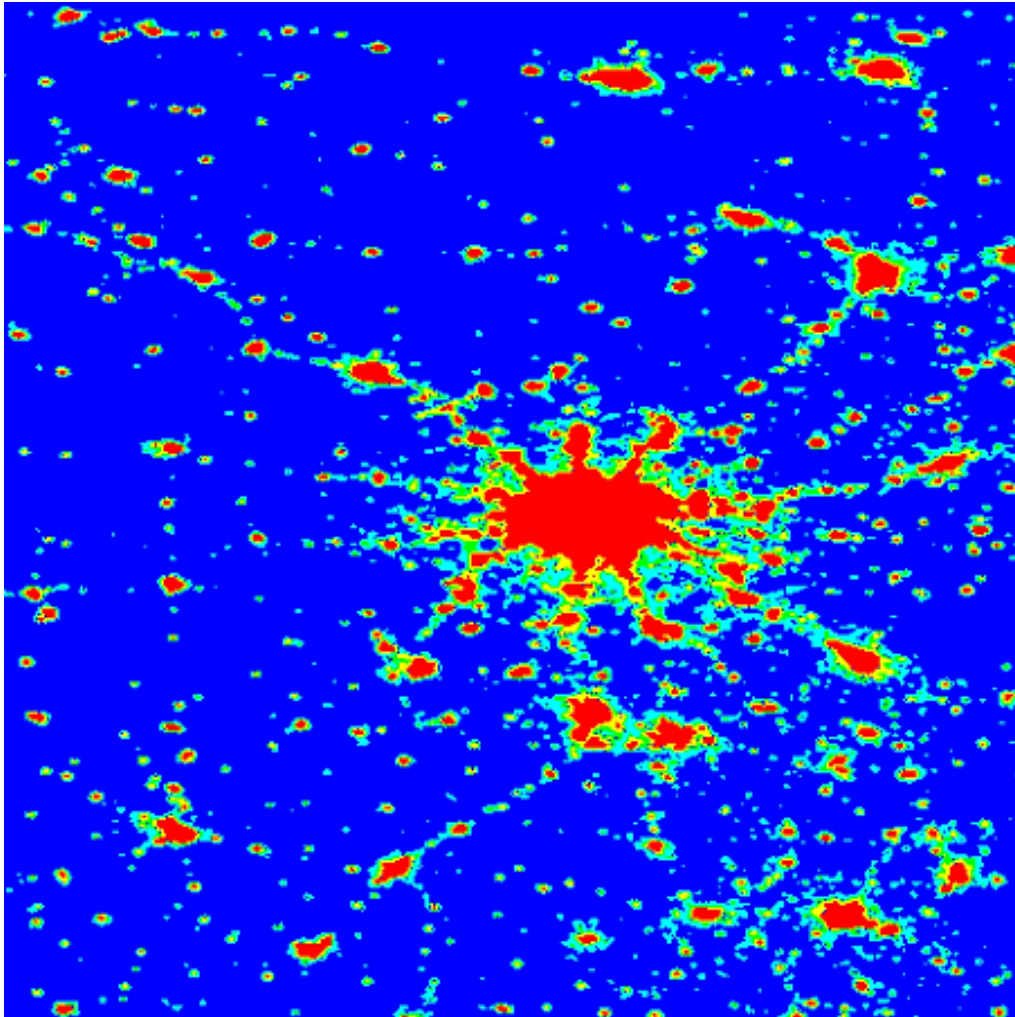


Рис. 4.2: Карта урбанизации на примере Московского Региона в 2008 году. Цветом выделены разные уровни урбанизации: (1) красным цветом показаны области с устоявшейся городской инфраструктурой, (2) желтым – близкие к устоявшейся инфраструктуре, (3) зеленым – с менее развитой инфраструктурой, (4) светло-синим – находящимся на ранних этапах развития инфраструктуры, (5) темно-синим – незатронутые активными процессами урбанизации

4.3 Карты изменений между двумя годами

Другой полезный тип инфографики для нашей задачи это визуализация сравнения ночных огней между годами. Годы могут последовательными, тогда видны изменения за прошедший год и сильно отличаться по времени, тогда видны изменения за этот более длительный промежуток времени.

На рисунке 4.6 показаны изменения в Московском Регионе за период с 2000 по 2011.

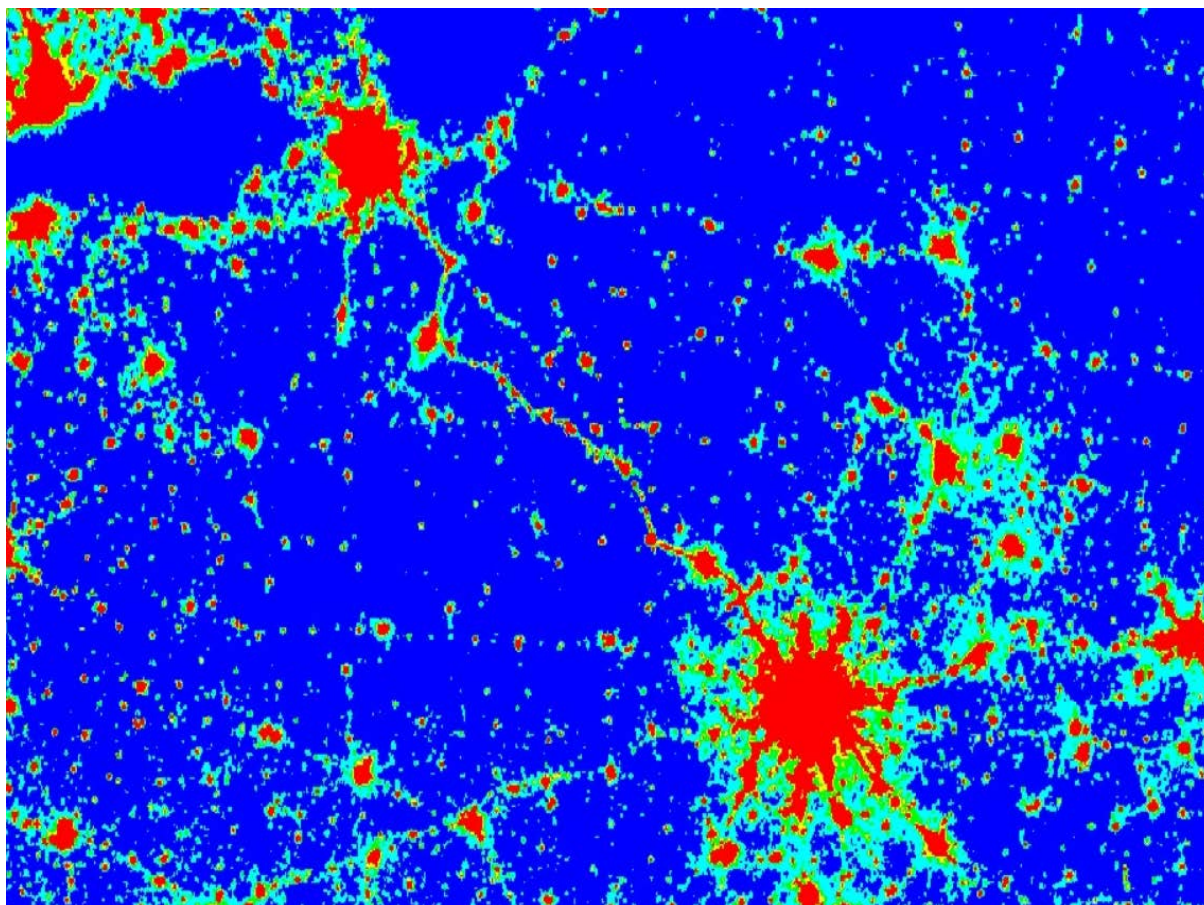


Рис. 4.3: Карта урбанизации для региона, включающего Москву и Санкт-Петербург (в 2012 году). Цветом выделены разные уровни урбанизации: (1) красным цветом показаны области с устоявшейся городской инфраструктурой, (2) желтым – близкие к устоявшейся инфраструктуре, (3) зеленым – с менее развитой инфраструктурой, (4) светло-синим – находящимся на ранних этапах развития инфраструктуры, (5) темно-синим – незатронутые активными процессами урбанизации.

В этом виде инфографики мы использовали простые методы классификации разности интенсивностей ночных огней: в каждом пикселе в зависимости только от значения разности и независимо от значений разности в соседних пикселах. Методы классификации, учитывающие значения разностей в соседних пикселах (или в некоторой окрестности пиксел) также могут быть легко реализованы.

Подобные методы визуализации изменений применимы и к большим регионам, например, включающим Москву и Санкт-Петербург (см. рисунок 4.7).

Если увеличивать площадь исследуемого пространства Земли, то можно заметить интересные тенденции. Интересно, сравнить, например, Индию и Китай, используя совместную карту изменений. Совместная карта изменений для Индии и Китая приведена (2000г. и 2011г.) на рисунке 4.9. Заметим, что даже на таком огромном мас-

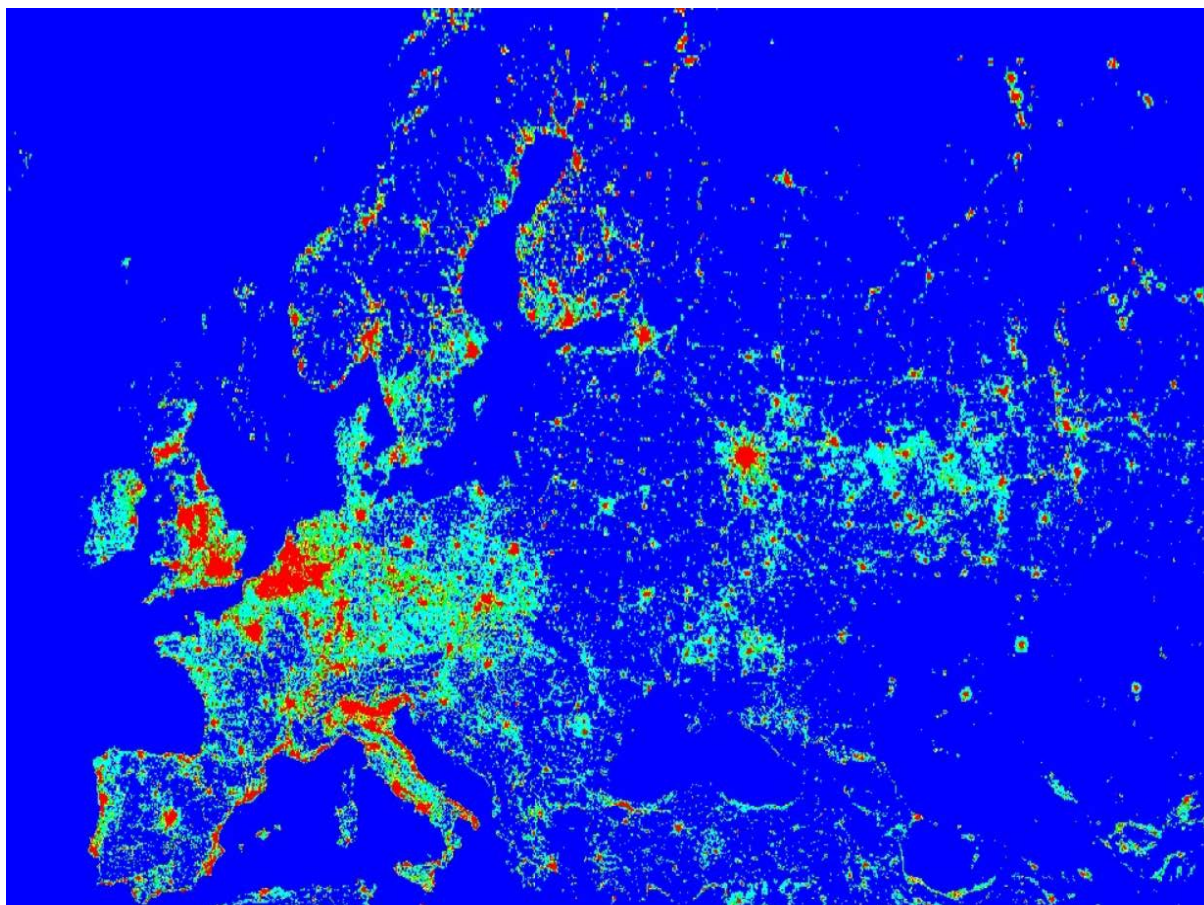


Рис. 4.4: Карта урбанизации для региона, включающего Европу вместе с частью РФ (в 2000 году). Цветом выделены разные уровни урбанизации: (1) красным цветом показаны области с устоявшейся городской инфраструктурой, (2) желтым – близкие к устоявшейся инфраструктуре, (3) зеленым – с менее развитой инфраструктурой, (4) светло-синим – находящимся на ранних этапах развития инфраструктуры, (5) темно-синим – незатронутые активными процессами урбанизации.

штабе карты изменений представляют определенную ценность, показывая наиболее развивающиеся регионы, хотя, естественно, и многое теряют по сравнению с картами на меньших площадях.

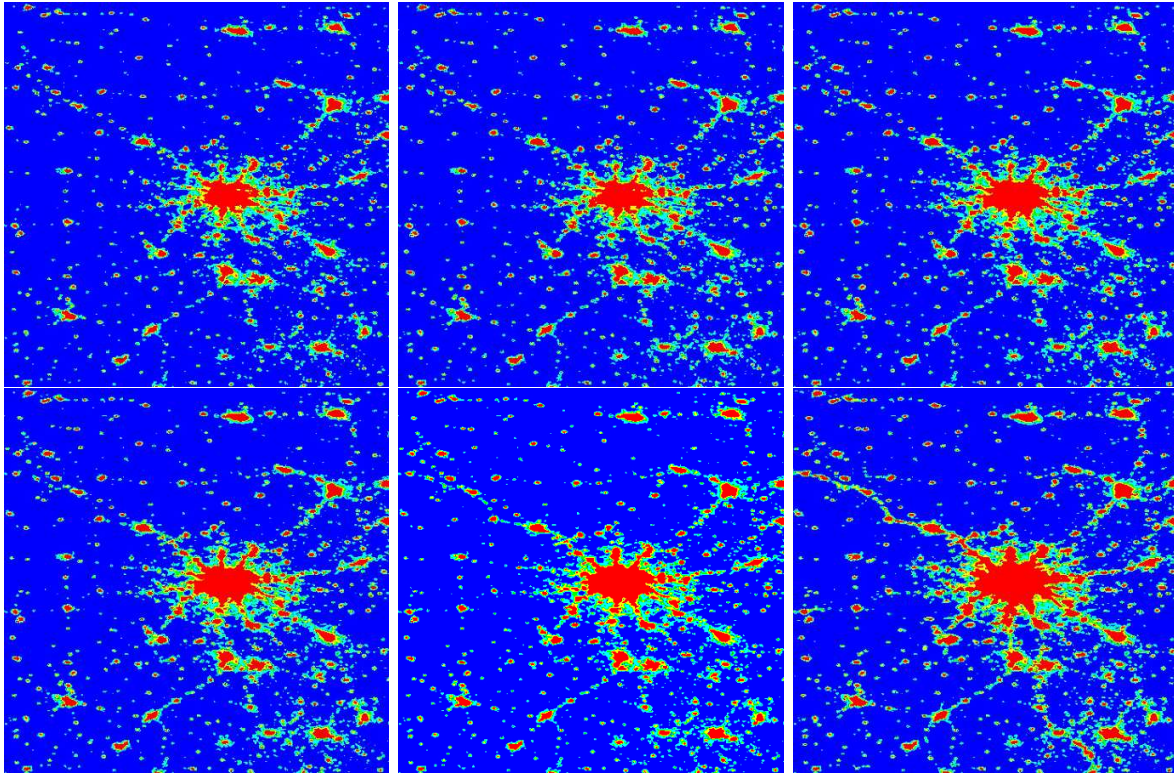


Рис. 4.5: Эволюция карты урбанизации Московского Региона за период с 1992 по 2013. Верхние картинки (слева направо): 1992г., 1996г., 2000г ; нижние картинки (слева направо): 2004г., 2008г., 2013г.

4.4 Карты трендов изменений ночных огней

Этот метод инфографики учитывает изменения ночных огней за некоторый интересующий нас временной период. Мы условно называем подобную инфографику как "карты трендов ночных огней". За этот период времени конкретные регионы (или даже страны) претерпели как позитивные изменения, так и негативные изменения, причем в разные годы. На карте трендов ночных огней похожие цвета (или похожие цветовые гаммы) соответствуют похожим паттернам изменения ночных огней (см. рисунок 4.8). В данном методе используются многомерные методы классификации "пикселей" в зависимости от поведения состояния ночных огней за весь исследуемый период. Данный метод потенциально имеет большие возможности, но еще далек от зрелости и требуются дополнительные исследования его применимости. На данном этапе, этот метод нужно рассматривать как экспериментальный.

Для примера, рассмотрим наблюдения ночных огней за некоторый временной период (например, с 1992 года по 2012 год).

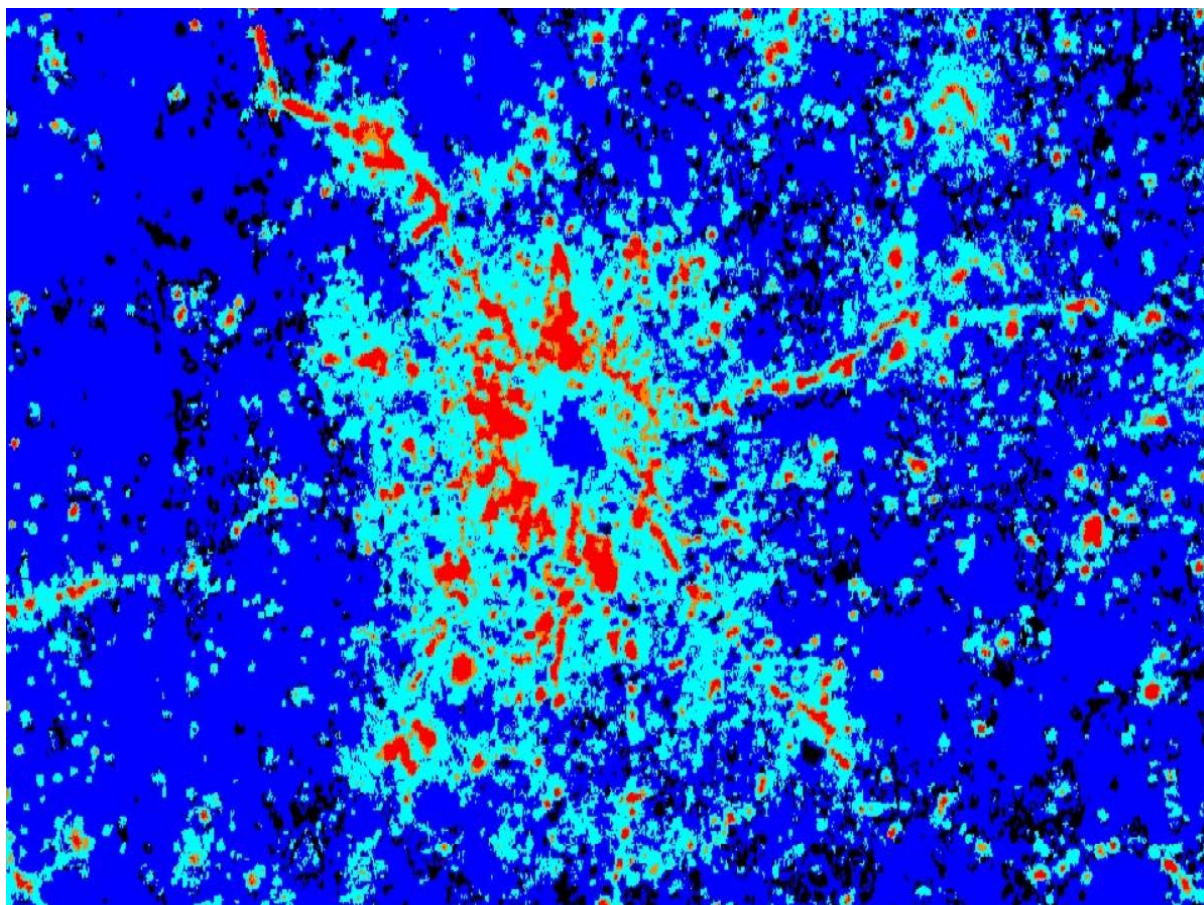


Рис. 4.6: Визуализация изменений в Московском Регионе за период с 2000 по 2011. Цветом выделены разные уровни изменений: (1) красным цветом отмечены области с устоявшейся позитивной тенденцией; (2) желтым цветом отмечены области, которые близки к области с устоявшейся позитивной тенденцией; (3) светло-синим цветом отмечены области, в которых мало изменений между годами; (4) синим цветом отмечены области, которые близки к области с устоявшейся негативной тенденцией; (5) темно-синим цветом отмечены области с устоявшейся негативной тенденцией.

5 Применение разновременных снимков ночных огней в рассмотрении социально-экономических процессов

5.1 Количественный мета-анализ

Мы провели анализ статей, опубликованных в рецензируемых журналах и найденных в базе данных ISI Web по ключевым словам «DMSP-OLS», «VIIRS», «DNB», «временные ряды», «разновременной», «панельный». После просмотра всех найденных статей

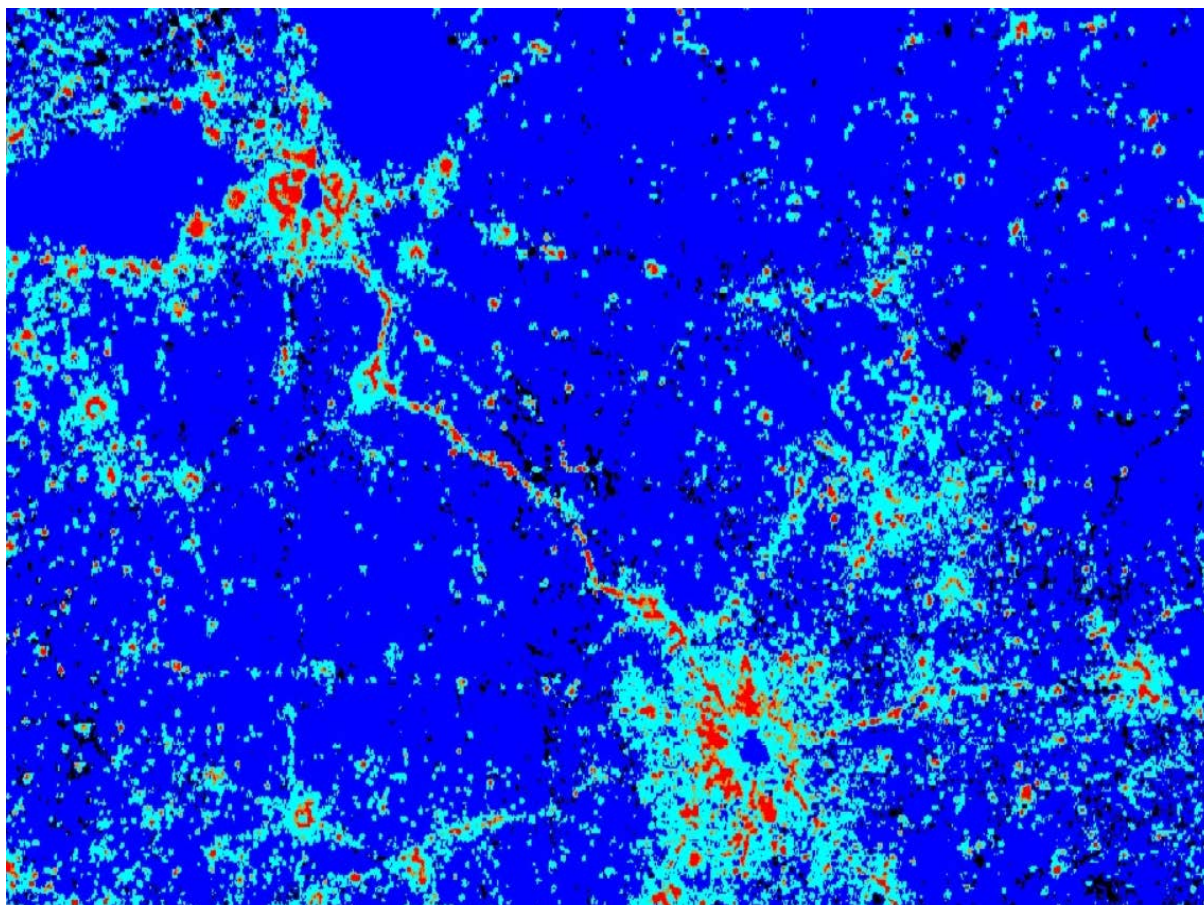


Рис. 4.7: Визуализация изменений в регионе включающим Москву и Санкт-Петербург за период с 2000 по 2011. Цветом выделены разные уровни изменений: (1) красным цветом отмечены области с устоявшейся позитивной тенденцией; (2) желтым цветом отмечены области, которые близки к области с устоявшейся позитивной тенденцией; (3) светло-синим цветом отмечены области, в которых мало изменений между годами; (4) синим цветом отмечены области, которые близки к области с устоявшейся негативной тенденцией; (5) темно-синим цветом отмечены области с устоявшейся негативной тенденцией.

и исключения не имеющих отношения к социально-экономическим переменным, мы изучили выборку статей из Google Scholar, которые отсутствовали в выдаче ISI Web. Большинство из них были посвящены вопросам экономики. После этого, мы сложили обе выборки и получили 63 рецензированных исследования за период времени с января 2004 по июль 2016, которые используют разновременные снимки OLS и/или VIIRS для оценки социально-экономических изменений. Эти исследования изучают вопросы урбанизации, изменения численности населения, и экономического роста в диапазоне с 1992 по 2014 гг. Мы внесли качественные и количественные данные из каждой публикации в базу данных, состоящую из 15 информационных полей.

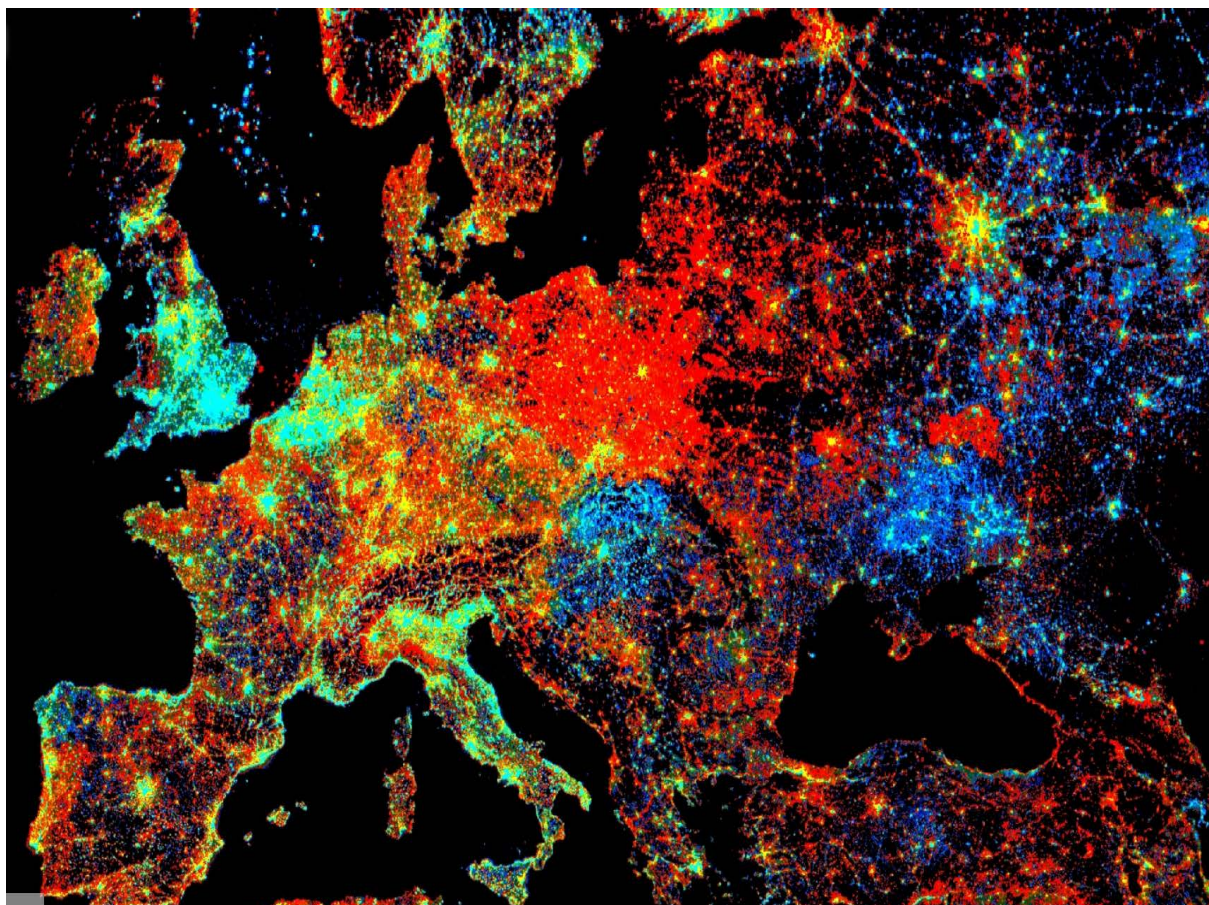


Рис. 4.8: Карта тренда изменений ночных огней в Европе (включая, часть России) за период с 1992 по 2012. Здесь, похожие цвета (или похожие цветовые гаммы) соответствуют похожим трендам изменения ночных огней.

С географической точки зрения, Китай является главным предметом рассмотрения в большинстве исследований (рис. 5.1). Двадцать из 63 исследований рассматривают исключительно Китай [15]; [47]; [43]; ([55], [54]); [64]; [82]; [85]; ([88], [87], [86]); [92]; [124]; [130]; [132]; [114]; [124]; [139]; [7]; [143], в то время как в работе [129] Китай является одной из четырех рассматриваемых стран в рамках серии предметных исследований. Важно отметить, что особое внимание, уделяемое Китаю, может привести к возникновению чрезмерной уверенности в том, что ночные огни могут выполнять функции косвенного показателя социально-экономических процессов и в других регионах. Пятнадцать исследований изучают разновременные огни в глобальном масштабе [2]; [17]; [18]; [20]; [27]; [46]; [49]; [57]; [59]; [81]; [89]; [66]; [105]; [141]; [142], в то время как два других рассматривают большое количество (> 39) стран, большинство из которых являются развивающимися [50]; [136]. Шесть исследований либо рассматривают регион, соседствующий с США, либо изучают США в качестве одного из основных участников предметных исследований [13]; [45]; [112]; [129]; [61];

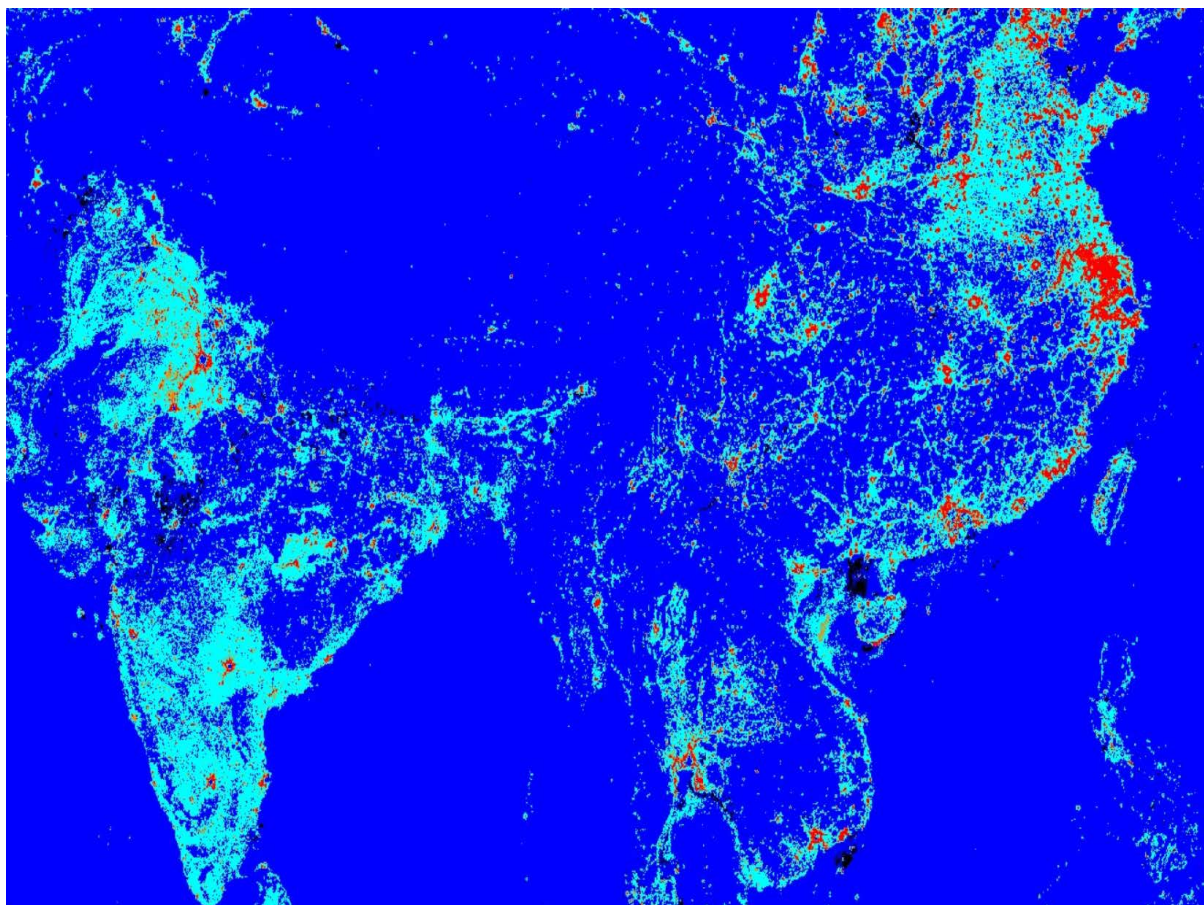


Рис. 4.9: Совместная карта изменений для Индии и Китая приведена (сравниваются изменения с 2000г. и 2011г.)

[142]. Африка, в основном, находится в компетенции экономистов, поскольку данный регион изучен довольно плохо ввиду нехватки экономических данных [21]; [97]; [98]; [111]. Принимая во внимание сложную ситуацию на Ближнем Востоке, все исследования, изучающие данный регион за исключением одного [112], рассматривают ночные огни через призму влияния войны на жизнь людей [1]; [84]; [83].

С точки зрения предмета исследования, 24 из 63 работ, найденных нами, напрямую рассматривают процессы урбанизации, 18 исследований сконцентрированы на экономических параметрах, а три занимаются изучением сельского населения. Остальные исследования изучают ряд других вопросов, приведенных в разделе 5. Более половины исследований (13/24), посвященных урбанизации, рассматривают Китай, чья динамика, как будет сказано далее, не обязательно должна соответствовать всему остальному миру. По этой причине, анализ городов за пределами Китая и, в частности, за пределами Азии (например, [6]; [109]), необходим для ответа на вопрос, демонстрируют ли они другие соотношения между ночными огнями и социально-экономическими переменными. Большинство исследований, затрагивающих вопросы экономики, оце-

нивают изменения объемов производства на разных масштабах: от домохозяйств до национальной экономики. Три исследования выбиваются из этого ряда и изучают региональное или этническое неравенство ([124]; [2]) или размер теневой экономики [131].

С точки зрения данных о ночных огнях, в 48 из 63 случаев, исследователи прямо заявляют, что они используют композитные изображения V4 OLS, причем в 43 из них используются снимки стабильных огней. Остальные пять исследований не содержат информации о том, какой тип огней используется при их проведении. Всего четыре многовременных исследования были опубликованы до выхода полного набора композитных изображений V4 OLS, который состоялся в 2007 г. [44]; [54]; [68]; [129], и всего одно исследование было основано на композитных изображениях стабильных огней V2 OLS [27]. До 2007 г., большинство исследований, изучавших ночные огни, были поперечными. Эта особенность является значимой, поскольку соотношение между, например, населением и ночными огнями, может серьезно отличаться в поперечном и панельном исследовании. Данные V4 OLS были использованы в 22 из 24 исследований, посвященных урбанизации (в двух оставшихся исследованиях не указана используемая версия данных OLS) и в большинстве исследований, посвященных экономическому развитию. Некоторые исследования из экономической группы использовали другие массивы данных, например, глобальные изображения, откалиброванные по яркости, которые использовались как сами по себе [124], так и в сочетании с композитными изображениями V4 OLS [136]. Использование разновременных данных VIIRS было обнаружено всего в трех исследованиях [13]; [116]; [112]. Это объясняется тем, что многие проекты, использующие подобный тип данных, в данный момент находятся на этапе исследований.

Еще одной отличительной особенностью данных исследований является использование логарифмических или нелогарифмических величин. Так, в большинстве экономических исследований ночных огней используются логарифмические переменные, а специалисты по дистанционному наблюдению используют их гораздо реже. В то время, как линейное соотношение между двумя логарифмическими переменными (логарифмически-линейное соотношение) подразумевает, что 10%-ое увеличение одной переменной влечет фиксированное в процентном соотношении увеличение другой переменной, линейное соотношение между нелогарифмическими переменными подразумевает, что фиксированное увеличение абсолютного значения одной переменной приводит к фиксированному увеличению абсолютного значения другой переменной. Это может создать дополнительные проблемы при наличии больших выпадающих из общего ряда показателей, которые могут исказить соотношение. В этой связи стоит отметить, что распределения ночных огней, ВВП, и населения на территории страны зачастую положительно искажаются. В заключение, некоторые исследования демонстрируют соотношение между ночными огнями и некоторой социально-экономической переменной (например, [92]; [129]; [141]). В то же время, в других работах используется уже имеющееся соотношение с целью спрогнозировать социально-экономическую переменную на другой территории или на другом временном отрезке с использованием ночных огней ввиду недостаточности или отсутствия других данных. Например,

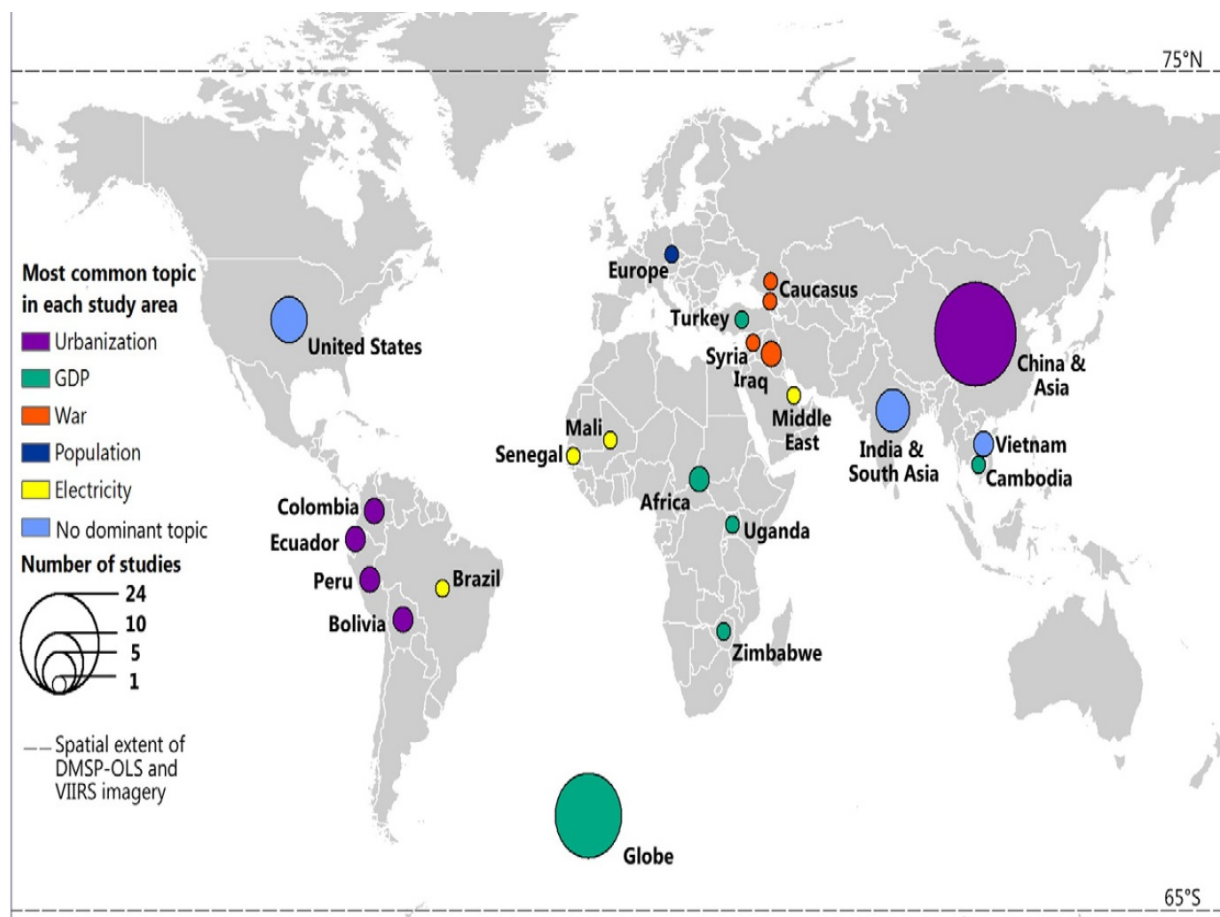


Рис. 5.1: Карта всех вышеупомянутых исследований, использующих разновременные данные DMSP-OLS и VIIRS с обозначением наиболее распространенных предметов изучения.

авторы [57] предоставляют обновленные оценки ВВП для некоторых стран с низким качеством экономической статистики. Принимая во внимание приведенный выше анализ разновременных и поперечных исследований, следующий раздел данной работы посвящен разбору трех основных социально-экономических категорий (урбанизация, экономическая активность, и население) и достижений в области их изучения, которым способствовало использование снимков ночных огней.

5.2 Урбанизация

Урбанизация – это широкое понятие, включающее городское население, городской земной покров, и городскую деятельность [142]. Помимо простого факта, что мегаполисы обычно ярко освещены, упор на города в исследованиях ночных огней говорит о том, что в научных кругах существует серьезный интерес к городской теме [74], а городская территория в целом на планете увеличивается рекордными темпами [23].

Ранние поперечные исследования демонстрировали возможность применения ночных огней в качестве косвенного показателя городского населения [126]; ([30], [32]). Эти соображения привели к тому, что данные OLS стали использоваться как входной параметр в моделях городского населения, например, в Глобальном проекте картографирования сельской и городской местности [4]. В качестве иллюстрации глобального процесса миграции сельского населения в города, в период с 1992 по 2009 большие города продемонстрировали пропорциональное увеличение яркости, которое было гораздо более заметным в сравнении с увеличением яркости небольших населенных пунктов [17]. Однако нельзя торопиться с выводом о том, что городские территории всегда излучают свет [9].

Чжанг и Сето (2011) провели одно из первых исследований долгосрочной динамики урбанизации в региональном и глобальном масштабе с использованием композитных изображений стабильных огней V4 OLS. Они оценили линейное соотношение между изменениями городского населения и ночных огней. Нормализованная разница в городском населении за период с 1992 по 2008 объяснила около половины отклонений в нормализованной разнице суммы огней. Однако, поскольку они не проводили взаимную калибровку имевшихся композитных изображений и не учитывали фиксированные эффекты, их результаты не дают объяснения различиям между сенсора, которые были обнаружены в работе [37]. Кроме того, использование в рамках данного исследования нелогарифмических значений отвечает на вопрос, почему исключение резко выделяющихся показателей Гренландии и России (страны, прошедшей через серьезные экономические потрясения и падение численности населения после распада СССР, что гипотетически могло разрушить привычное соотношение между данными факторами и ночными огнями) увеличивает значение R^2 с 0.45 до 0.76. В другом случае, один выбивающийся из общего ряда показатель влияет на наклон линейного соотношения между нормализованными различиями между населением и городской территорией (выведенными на основе композитных изображений годовых стабильных огней V4 OLS) на уровне штатов в Индии за период с 1998 по 2008, что показано на диаграмме рассеяния в работе [107]. К сожалению, данный феномен остается неизученным. В исследованиях, проводящих анализ на основе регрессии [142]; [107], большая прозрачность при работе с резко выделяющимися показателями поможет ответить на вопрос, разделяют ли они экономические и географические сходства, которые, в свою очередь, ослабляют корреляцию между изменениями в ночных огнях и урбанизацией.

Наиболее заметные изменения ночных огней произошли в Азии [119]. В период с 1992 по 2009, географический центр ночных огней на поверхности Земли сместился на 1000 км восточнее, отразив рост азиатских мегаполисов за два последних десятилетия [17]. Схема стратифицированной случайной выборки пикселей ночных огней из данных о стабильных огнях V4 OLS спутника F14 позволила установить, что 25% глобальных урбанизационных процессов в период времени с 1997 по 2003 пришлось на Китай [141]. Китайские города также являются предметом частого обсуждения в научных публикациях о ночных огнях, изучающих вопросы урбанизации [43]; [47]; [88]; [87]; [86]; [92]; [48]; [114]; [139]. Многие из этих исследований обнаружили сильную

взаимосвязь между изменениями ночных огней (как с точки зрения суммы огней, так и с точки зрения освещенной территории) и изменениями таких переменных, как рост городского населения, городской ВВП, увеличение площади городов, и потребление электроэнергии в китайских городах, подтверждающуюся с течением времени. Однако количественное выражение изменений ночных огней по отношению к изменениям социально-экономических переменных могут меняться в зависимости от города. Используя данные о взвешенных освещенных территориях в более чем двухстах китайских городах за период с 1994 по 2009, полученные на основе композитных снимков стабильных огней V4 OLS, авторы [92] обнаружили, что соотношение между изменениями ВВП и взвешенных освещенных территорий в таких городах, как Пекин и Нанкин соответствует степенной модели. Несмотря на это, линейная модель лучше описывает подобное соотношение в городах, находящихся на более ранних стадиях развития, например, Цзинань и Фушунь. Эти результаты говорят о том, что исследователи должны принимать во внимание различные варианты реакции ночных огней на социально-экономические изменения в зависимости от уровня развития той или иной территории, а не полагаться исключительно на линейные функциональные формы.

В целом, китайские города по-прежнему характеризуются едиными моделями урбанизации, сопряженными с быстрым или умеренным ростом городского населения, происходящем по всей территории страны [141]. Для сравнения, южноамериканские города демонстрируют удивительное разнообразие пространственно-временной городской динамики развития [6]. Так, города на территории Эквадора и Боливии характеризуются «промежуточным» этапом перехода к урбанизации с более высокими темпами расширения ярко освещенных пикселей (значение дискретных чисел $> 52 - 63$) по сравнению с городами в Перу и Колумбии, которые проходят «продвинутый» этап урбанизации. Исследования, подсчитывающие разницу в общей сумме огней определенного города, не принимают во внимание подобные нюансы городских изменений.

Скорость изменения, или наклон соотношения между урбанизацией и ночными огнями также серьезно отличается в зависимости от города даже в пределах одной страны. В случаях, когда ночные огни используются в качестве косвенного показателя, постоянство наклона в разных контекстах имеет даже большее значение, чем постоянство коэффициента детерминации (R^2) несмотря на то, что на данный коэффициент ссылаются гораздо чаще. Даже если R^2 является единым для всех масштабов или контекстов, изменяющийся наклон серьезным образом ограничивает использование ночных огней в качестве косвенного показателя. В качестве примера наклонов, изменяющихся в рамках одной страны, авторы [47] приводят Китай, в котором на уровне страны, провинций, и уездов, составной индекс ночных огней (полученный посредством умножения среднего значения дискретного числа всех освещенных пикселей в регионе на соотношение освещенной городской территории к общей площади региона) увеличивается на 1705.43, 90.52, и 72.81 единицы соответственно, что ведет к увеличению индекса урбанизации. Значения индекса урбанизации получены посредством добавления различных социально-экономических переменных, имеющих отношение к урбанизации.

Наклон соотношения между ночными огнями и урбанизацией варьируется также и между странами. Авторы [146] провели регрессию темпа роста ночных огней на промежутке с 2000 по 2010 (рассчитанного как изменение в сумме огней, где дискретное число ≥ 13) относительно логарифмического показателя численности населения за 2000 г. в городах на территории пяти азиатских стран. Наклон в Индии составил 0.37 (выраженный в единицах изменения логарифмического показателя численности населения относительно изменения темпа роста ночных огней), в Пакистане – 2.33, в Непале – 5.53, на Шри-Ланке – 0.37, а в Бангладеше – 1.73. Анализ столь широкого разброса показателей наклона, к сожалению, отсутствует. Используя композитные изображения стабильных огней V4 OLS за период времени с 1992 по 2012, в работе [89] установили, что среднее значение дискретного числа (DN) (среди пикселей, чье дискретное число > 30) в течение года увеличивается быстрее в быстрорастущих городах, таких как Шанхай или Дубай (0.76-1.58 от значения дискретного числа), чем в менее быстрорастущих городах, например, Брюссель, Лондон, и Стокгольм (0-0.08 от значения дискретного числа). Медианный наклон (оценочная функция Тейла-Сена) рассчитывается для всех пар наблюдений каждого города, а получившиеся значения ранжируются и классифицируются по скорости процесса от медленной к быстрой урбанизации. Для таких городов как Лондон, насыщение или замедление процесса урбанизации, или комбинация обоих факторов, может служить причиной крайне незначительного годового изменения среднего значения дискретного числа. Постоянная неуверенность касательно того, являются ли изменения в наблюдаемых ночных огнях отображением реальных процессов, протекающих на поверхности планеты, или визуальным искажением, возникшим при работе сенсора, подчеркивает необходимость более подробного изучения данного вопроса, что указано в разделе 6 данной работы.

Сочетание массивов оптических данных или данных о ночных огнях, прошедших проверку на местности, с исследованиями и полевой работой (например, [3]; [102]; [103] может повысить точность информации и поможет обнаружить источники видимого из космоса света внутри городов. Это предположение справедливо, в частности, для развивающихся стран, в которых ночные огни определяют урбанизацию не так точно, как в случае с развитыми странами. Например, во многих крупных городских районах Индии отсутствует электричество, что серьезно затрудняет их обнаружение посредством OLS или VIIRS [141]. В целом, урбанизация не так хорошо коррелирует с наружным и уличным освещением в развивающихся странах в сравнении с промышленно развитыми регионами. Чтобы определить увеличение городской территории в Индии, в работе [107] объединили композитные изображения стабильных огней V4 OLS, прошедшие взаимную калибровку, и данные SPOT vegetation нормализованного разностного вегетационного индекса (НРВИ/NDVI) за период времени с 1998 по 2008. Этот подход расширяет и дополняет многоисточниковый метод классификации изображений, разработанный в [12], который серьезно улучшил способность определять городские территории посредством использования глобального порогового значения, что позволило более точно исключать зоны растительности и водные пиксели. В работе [46] изучили данные OLS за период с 1999 по 2009 и сравнили среднее значение дискретного числа ста крупных городов в рамках сетки размером 11×11 ячеек

с мощностью обратного рассеяния микроволнового скаттерометра SeaWinds. Они выяснили, что индийские города растут горизонтально, но не вертикально, что ведет к росту освещенной территории. В то же время, китайские города растут как горизонтально, так и вертикально, что ведет не только к увеличению площади освещенной территории, но и к увеличению интенсивности света. Таким образом, дальнейшее сочетание данных OLS и VIIRS с другими дистанционными снимками поможет улучшить качество обоснования наличия наблюдаемых ночных огней в зависимости от уровня развития той или иной территории.

5.3 Экономическое развитие и упадок

Большое количество исследований подтверждают тесную взаимосвязь между ночными огнями и экономической активностью в масштабах одного года [26]; [29]; [129]; [128]. При поперечном анализе, ночные данные имеют более тесную взаимосвязь с показателем ВВП, чем с показателем населения ([32]); [146]. В неоднородной группе из 21 страны, освещенная территория и показатель ВВП характеризовались наличием логарифмически-линейного соотношения с R^2 равным 0.97 ([32]). Связь освещенной территории, и, в частности, производных от суммы огней, с экономической активностью, дает возможность нанести на карту и оценить ВВП на основании данных о ночных огнях на разных масштабах и для территорий, которые не обладают стандартными статистическими данными, что показано на примере создания первой в мире глобальной карты ВВП размером $1^\circ \times 1^\circ$ [25]. И хотя в [129] утверждается, что данные OLS могут предоставить только грубую оценку регионального ВВП с сомнительной значимостью ввиду их низкого пространственного и спектрального разрешения, эти данные использовались для довольно точного прогнозирования уровня благосостояния домохозяйств в развивающихся странах [136]; [63].

В рамках фундаментального панельного исследования с использованием композитных изображений стабильных огней V4 OLS, посвященного прогнозированию реального роста уровня доходов в 188 странах на протяжении 17 лет, ночные огни и ВВП демонстрируют логарифмически-линейное соответствие [57]. С глобальной точки зрения, эластичность суммы огней по отношению к показателю ВВП составляет 0.28 и является высоко значимой. Сумма огней объясняет около 77% вариаций ВВП, возникающих с течением времени в рамках одной страны (а также принимает во внимание годовые фиксированные эффекты). В то же время, она объясняет только 21% вариаций ВВП после центрирования данных. В работе [57] приходят к выводу, что рост ночных огней является очень полезным косвенным показателем, как для измерения долгосрочного роста ВВП, так и для оценки его краткосрочных колебаний. Исследователи также предоставляют обновленные оценки темпов роста ВВП в странах с низким качеством статистических данных, например, Бурунди и Мьянме. Однако их модель предполагает, что реальное соотношение между логарифмически-линейными показателями ночных огней и ВВП на уровне страны варьируется ежегодно на основе логарифмически-аддитивной константы, что не всегда соответствует действительности.

Несколько разновременных исследований ночных огней, посвященных экономическим вопросам, построены на работе [57]. В отличие от большинства исследований ночных огней, проведенных специалистами по дистанционному наблюдению, экономисты имеют склонность к проведению панельных регрессий с анализами чувствительности и изучению ночных огней в нетрадиционном контексте. Так, они используют ночные огни при рассмотрении мест, где грузы переправляют волоком ввиду большого количества водопадов (геоморфологический разрыв между зоной разгрузки грузов и прибрежными территориями) на юго-востоке США [8], или при исследовании этнолингвистических исконных территорий по всему миру [2]. Экономисты также опираются на вспомогательные данные в дополнение к традиционным параметрам численности населения и ВВП. Например, в панельном исследовании с использованием данных о локализации событий вооруженных конфликтов и данных опросов об уровне доверия населения и отношению общественности к социально-экономическим вопросам в рамках исследовательской сети Афробарометр, в [111] установили, что конфликты на территории этнически раздробленных стран неизбежно ведет к снижению интенсивность ночных огней. В рамках другого панельного исследования, охватившего 38427 субнациональных регионов на территории 126 стран на протяжении 1992-2009 гг., в работе [59] использовали информацию о месте рождения национальных политических лидеров, и пришли к выводу, что после прихода к власти, в их родных регионах количество ночных огней выросло на 4%. Исследователи считают это признаком регионального фаворитизма, а их исследование демонстрирует пользу комбинирования данных о ночных огнях с качественной информацией при исследовании экономических вопросов, не связанных с простой оценкой ВВП.

Как экономисты, так и специалисты по дистанционному наблюдению, работающие со снимками ночных огней, редко цитируют исследователей из другой группы в своих работах, однако оба научных сообщества могли бы извлечь немало пользы от изучения методов работы своих коллег. Поскольку данные о ночных огнях открыли для экономистов сферу дистанционного наблюдения, междисциплинарные исследования могут оказаться очень продуктивными [66]. Авторы [66] рассматривают причинно-следственную связь между сельским хозяйством и ночными огнями посредством нанесения на карту яркости, отраженной на композитных снимках V4 OLS, и сравнением ее с изображением земного покрова MCD12Q1, сделанного на оборудовании MODIS. Сравнение заключается в сопоставлении каждой отдельной ячейки за период времени с 1992 по 2009 г., и включает данные о земном покрове в оценку модели, разработанной в [57]. Территории, обозначенные MODIS как пахотная земля, рисовые поля, и растительность, не излучают никакого или практически никакого света в сравнении с городскими территориями. Таким образом, в странах, где сельское хозяйство составляет более половины экономики, эластичность логарифмического показателя ночных огней относительно логарифмического показателя ВВП (включая фиксированные страновые и годовые эффекты) является незначительной и равна 0.03. Это ниже общемировой средней эластичности, которая, по расчетам из [57], равна 0.28. Она также гораздо ниже высоко значимой эластичности, равной 0.67, которую в [66] рассчитали для неаграрных стран, в которых доля сельского хозяйства в национальной

экономике не превышает 10%. Однако даже в контексте высокоразвитых и урбанизированных стран, необходимо проделать большой объем работы, чтобы разобраться в соотношениях ночных огней и экономических секторов, которые часто ассоциируются с ними. Например, сталелитейное производство сопряжено с излучением гораздо большего объема света в сравнении с производством программного обеспечения [57], хотя доля сталеварения в общем ВВП может быть заметно ниже.

Упомянутые выше исследования наглядно демонстрируют сложности, связанные с выводами на основе логарифмически-линейных соотношений между ночными огнями и ВВП на региональном и международном уровне. При рассмотрении группы из 83 стран в период времени 1992 по 2010, авторы [50] показывают, что различия в показателях ВВП на душу населения, как и следовало ожидать, объясняют большинство вариаций ночных огней между странами. Однако реальная интенсивность ночных огней в пересчете на душу населения на 3.6% ниже, чем прогнозируемая интенсивность на основе регионального ВВП на душу населения в наиболее бедных регионах (нижняя квартиль) и на 2.5% выше прогнозного показателя в наиболее богатых регионах (верхняя квартиль). Дальнейшее изучение причин подобных неточностей в прогнозах поможет исследователям, занимающимся оценкой ВВП на основе данных о ночных огнях, избежать завышения оценок в высокоразвитых регионах и их занижения в менее развитых областях.

Как и в случае с урбанизацией и численностью населения, рост экономической активности рассматривается в научных публикациях гораздо чаще, чем ее упадок. Тем не менее, некоторые исследования посвящены именно снижению темпов экономического развития. Так, уменьшение количества ночных огней в постсоветских городах может интерпретироваться как следствие экономических проблем в стране [35]. Схожая причина гипотетически объясняет потускнение ночных огней в Зимбабве, которая пережила серьезный экономический кризис в период с 1992 по 2009. Проанализировав 500 выборок показателей изменения суммы огней относительно ВВП за тот же период времени в той же стране, в работе [80] получили значение R^2 , равное 0.55 при отсутствии резко выделяющихся из общего ряда показателей. Однако ночные огни потускнели и на территориях, не испытавших экономических потрясений или снижения численности населения, например, в Скандинавии. В этом случае, потускнение скорее отражает успешную борьбу со световым загрязнением [7]. В целом, авторы [57] пришли к выводу, что ночные огни реагируют симметрично как на позитивные, так и на негативные изменения в уровне доходов за период времени с 1998 по 2008, что говорит об отсутствии эффекта храповика. Тем не менее, реакция ночных огней (потускнение) на экономические спады запаздывает на коротких временных отрезках, что натолкнуло авторов [57] на мысль о том, что данные о ночных огнях наилучшим образом подходят для прогнозирования долгосрочного устойчивого роста, а не краткосрочного падения.

В заключение, несмотря на большое количество исследований, в рамках которых ночные огни используются в качестве косвенного показателя объемов производства, существует расхождение во мнениях касательно устойчивости данного соотношения в развивающихся странах. В то время как большинство исследователей изучают со-

отношения между ночными огнями и экономической активностью, например, в [21] фокусируются на оценке надежности ночных огней в качестве косвенного показателя объемов производства на уровне стран и регионов. В ходе их предыдущего исследования, они установили, что композитные изображения стабильных огней OLS, используемые в качестве косвенного показателя, повышают эффективность оценки экономических индикаторов. Этот вывод справедлив для стран с низким качеством статистических данных, как в рамках поперечного анализа, так и в рамках анализа временных рядов [20]. Однако в [21] также отметили, что в рамках анализа временных рядов, данные OLS имеют низкую эффективность при оценке изменений экономической активности в странах, обладающих соответствующими статистическими данными хорошего качества, что не совсем соответствует выводу в работе [57]. Более того, в [21] утверждается, что ни данные OLS, ни модель взаимной калибровки не предоставляют достаточно точной информации, чтобы оценивать темпы экономического развития на основе разновременных снимков ночных огней даже в странах с низким качеством статистических данных. Тем не менее, исследователи подтвердили, что данные о ночных огнях могут внести существенный вклад в поперечные оценки объемов производства. Их вывод основывается на том, что недостоверность, возникающая при использовании ночных огней в качестве косвенного показателя объемов производства в рамках одного года, по большей части объясняется недостоверными данными государственной статистики, а не погрешностями в самих данных OLS [105]. Придя к похожему выводу, авторы [129] установили, что наибольшая погрешность измерения корреляции ночных огней с экономическим развитием имеет место на уровне субнациональных регионов с очень низким уровнем экономической активности. Эта погрешность объясняется либо неполнотой данных о ВВП, либо неспособностью системы OLS обнаружить и зафиксировать тусклые огни, ассоциирующиеся с низким уровнем экономической активности. В силу всех вышеназванных причин, оценка экономического роста в слаборазвитых странах с использованием данных OLS по-прежнему является трудной задачей. Перспективой в этом отношении обладают данные VIIRS, которые демонстрируют более сильную корреляцию с объемами производства и на более мелких масштабах в сравнении с данными OLS о стабильных огнях [21]. Данные VIIRS также смогут улучшить качество оценок территорий с низким уровнем экономической активности или недостаточной яркостью ночных огней в случае, если сенсор обнаружит слабое освещение в областях, помеченных в данных DMSP-OLS, как имеющие дискретное число, равное нулю. Таким образом, высокая чувствительность и бортовая калибровка сенсора VIIRS может повысить точность оценок экономического роста и упадка, наблюдаемого из космоса.

5.4 Изменение численности населения

Основная доля роста численности населения Земли приходится на развивающиеся страны, которые зачастую характеризуются низким качеством демографической статистики. Это позволяет рассматривать ночные огни в качестве ключевого источника информации, на основании которой представляется возможным оценивать демогра-

фические тенденции. Однако моделирование демографической динамики в развивающихся странах является непростой задачей, поскольку, в глобальном масштабе, минимальный порог населения, которое можно обнаружить с помощью системы OLS, варьируется. Африка характеризуется меньшей плотностью населения в сравнении с Азией, Европой, и Северной Америкой, что влечет за собой более низкие пороговые значения ночных огней, необходимые для обнаружения антропогенной активности. Поперечный анализ показал, что средняя плотность населения неосвещенных областей варьируется от 10.05 чел./км² в Латинской Америке и странах Карибского бассейна до 208.18 чел./км² в Индии [27]. Таким образом, плотность населения имеет более слабую взаимосвязь с интенсивностью ночных огней, чем экономическая активность. Территория с плотностью населения в 1000 чел./км² в развитой стране будет ярче, чем в развивающемся регионе, хотя в данном соотношении и присутствует серьезный разброс [110]. Эта разница осложняет попытки оценки глобальной и региональной численности населения на основе ночных огней.

Изменение ночных огней в целом имеет серьезную положительную корреляцию с изменением численности населения, но это может являться следствием глобального роста населения. Определенные области со снижающейся численностью населения демонстрируют отрицательную корреляцию с ночными огнями. За период времени с 1992 по 2012 гг., в 90% стран изменение ночных огней соотносилось с изменением численности населения и показателя ВВП [40]. Большинство исключений сосредоточены на территории стран бывшего Советского Союза и Восточной Европы, где сокращение численности населения наблюдалось в большом количестве государств. Эти исключения можно разделить на две группы. В первой группе, изменение ночных огней имеет положительную корреляцию с изменением ВВП, но отрицательную корреляцию с изменением численности населения (т.е. при уменьшении населения ночные огни не меняются). Примерами таких стран являются Албания и Польша, а их ночные огни характеризуются «фокусом на ВВП». Во второй группе, изменение ночных огней имеет положительную корреляцию с изменением численности населения, но отрицательную корреляцию с изменением ВВП (т.е. при уменьшении ВВП огни не меняются). Примерами таких стран являются Россия и Казахстан, а их ночные огни характеризуются «фокусом на населении» [40]. Занимаясь дальнейшим изучением необычного характера соотношений между ночными огнями и численностью населения в Восточной Европе с использованием сумм огней на уровне стран, подсчитанных на основе взаимно откалиброванных композитных изображений стабильных огней V4 OLS за период времени с 1992 по 2012, авторы [10] установили, что всего 23% значимых случаев уменьшения численности населения соотносятся с изменением масштабов освещения, в то время как рост населения соотносился с изменениями масштабов освещения в 93% значимых случаев. Например, бывшие советские республики Латвия, Литва, и Эстония демонстрируют устойчивый рост ночных огней, несмотря на уменьшение численности населения. Авторы [10] пришли к выводу, что тесная положительная взаимосвязь между ночными огнями и численностью населения, прослеживаемая на отрезке одного года в рамках поперечных анализов (например, ([32]); [127], может нарушиться при рассмотрении ее в пределах одной страны и на более про-

должительном отрезке времени. В этой связи, изменения ночных огней и численности населения не всегда соотносятся даже за пределами Восточной Европы. Так, в [145] не обнаружили корреляции между ежегодными темпами роста населения и суммой огней на ярко освещенных городских территориях в Южной Азии ($R^2 = 0.02$). Все эти выводы свидетельствуют о необходимости уделять достаточное внимание всем обстоятельствам при прогнозировании изменений численности населения на основе ночных огней.

Несмотря на все вышеуказанные оговорки, авторы [18] используют ночные огни при оценке демографической динамики. Они определили, что в период времени с 1992 по 2013 гг., места обитания людей по всей планете существенно приблизились к рекам. Такой вывод был сделан на основании подсчета изменений общей и средней сумм огней на пространственном разрешении в 1 км^2 и разбивке расстояния до рек и других водоемов на пять классов отдаленности. Учитывая существующие отличия в среднем количестве огней на душу населения, зависящем от степени экономического развития страны, изменение дискретного числа пикселя в районе Нила на 5 единиц отражает более масштабное изменение численности населения, чем изменение дискретного числа пикселя на те же 5 единиц в районе Дуная. Таким образом, несмотря на то, что изменения ночных огней и численности населения зачастую соответствуют друг другу, точная оценка масштаба изменения населения по-прежнему представляется сложной задачей.

Как и в случае с оценками экономической активности на основе данных ночных огней, темные или очень тусклые пиксели могут повлиять на оценки численности населения. Так же как фермерство и лесозаготовка не подразумевают наличие большого объема исходящего света, несмотря на их вклад в национальный ВВП, многие территории являются обитаемыми, несмотря на то, что они не излучают видимого света. Около полутора миллиардов человек не имеют доступа к электричеству, что не позволяет отслеживать с помощью снимков ночных огней ни общую численность населения в таких регионах, ни ее колебания [27]. В работе [21] определили, что на композитных изображениях стабильных огней V4 OLS за 2000 г., практически треть ячеек сетки размером $1^\circ \times 1^\circ$, на территории которых в реальности проживают люди, обладают нулевым значением дискретного числа. На долю России, Канады, и Африки приходится 67% подобных «нулевых» ячеек. Несмотря на то, что они составляют всего 0.4% от общей численности населения планеты и глобального объема производства, суммарная площадь ячеек с нулевым показателем освещенности является весьма внушительной. Поскольку вероятность того, что экономическая активность протекает в полной темноте, крайне мала, нулевые показатели освещения можно объяснить неспособностью системы OLS определить и зафиксировать тусклые огни. Еще одним объяснением может служить тот факт, что композитные снимки стабильных огней исключают территории с нестабильным освещением, характерным для сельских районов развитых стран мира с низкой нагрузкой на электросети [103].

Сенсор VIIRS может улучшить качество фиксации и оценки численности населения, как в развитых, так и в развивающихся регионах благодаря защите от насыщения и более низкому порогу обнаружения освещения. Ранние поперечные исследо-

вания подтвердили наличие у VIIRS соответствующего потенциала. На примере 100-километровой широтной зоны с центром в Пекине, яркость ночных огней, измеренная посредством VIIRS, продемонстрировала более выраженную реакцию на численность городского населения, чем снимки стабильных огней OLS (значения R^2 равны 0.89 и 0.83 соответственно). Кроме того, данные VIIRS отразили колебания численности населения на переходных участках между городской и сельской территорией ([95]). На территории Африканского континента в масштабе ячеек сетки размером $1^\circ \times 1^\circ$, двухмесячное композитное изображение VIIRS за 2012 г. показывает, что соотношение между интенсивностью ночного освещения и численностью населения имеет R^2 , равный 0.59. В то же время, согласно композитному снимку стабильных огней OLS со спутника F18 за 2010 г., коэффициент R^2 равен всего 0.27 [21]. Очевидно, что сбор большой базы снимков VIIRS для оценки годовых изменений численности населения займет некоторое время, однако гипотетическая возможность разделения данных об изменениях ночных огней и изменениях численности населения может отразиться на точности оценок демографических тенденций. Тем не менее, основываясь на анализе работ, опубликованных вслед за появлением композитных изображений стабильных огней V4 OLS за период времени с 1992 по 2013 гг., мы предполагаем, что создание и открытая публикация ежегодных композитных изображений стабильных огней на базе сенсора VIIRS внесет положительный вклад в дальнейшие исследования и повысит качество оценок различных демографических параметров. Уже сейчас, композитное изображение ночных огней на основе VIIRS за 2012 г. служит одним из источников данных в проекте глобальной оценки численности населения WorldPop [122].

5.5 Дополнительные социально-экономические показатели

Разновременные данные о ночных огнях применяются при изучении динамики большого спектра дополнительных социально-экономических показателей. Примерами подобных показателей могут служить региональное неравенство [124]; [145], потребление электричества и доступ к электроэнергии [13]; [14]; [19]; [27]; [44]; [55]; [103]; [102], перебои в электроснабжении по причине природных катастроф [13]; [68]; [104], увеличение объема грузовых перевозок [116]; [132], антропогенное воздействие на окружающую среду [49]; [88], производство стали [85], а также последствия вооруженных конфликтов [1]; [81]; [138]; [116]. Разновременные снимки ночных огней также могут использоваться для демонстрации того, как непрерывно увеличивающийся масштаб деятельности человека влияет на заповедные [135] и охраняемые территории [48]; [49].

Несмотря на низкое пространственное разрешение системы OLS, авторам [138] удалось соотнести данные о ночных огнях с крупными и длительными пожарами, а также перемещениями беженцев на территории охваченного войной Кавказского региона. На основании результатов их исследования, можно высказать предположение о том, что использование сенсора VIIRS позволит обнаружить из космоса перемещения беженцев на меньших географических масштабах, например, бегство мирного населения из Сирии в Европу. Гражданская война в Сирии открыла новые возможности для применения разновременных данных VIIRS в целях гуманитарного наблюдения. В

работе [83] зафиксировали 74%-ное снижение суммы огней и 73%-ное снижение площади освещенной территории в Сирии за период с марта 2011 по февраль 2014. Они пришли к выводу, что изменение суммы огней объясняет 52% вариаций в общей численности вынужденных переселенцев внутри страны. В дополнение к их исследованию, рис. 6.1 наглядно демонстрирует резкое уменьшение количества ночных огней в период с 2014 по 2016 гг. вдоль шоссе, контролируемого ИГИЛ, и их увеличение в районе государственной границы с Турцией, куда бежали сотни тысяч беженцев. Более оптимистичное исследование, проведенное в [112], связывает колебания яркости ночных огней в городах на территории США и Ближнего Востока с уличным освещением кварталов во время праздников, что позволяет предположить, что данные VIIRS могут быть использованы при разработке более эффективных стратегий энергосбережения. Таким образом, данные VIIRS могут задать направления изучения социально-экономических процессов в любом масштабе, от городского квартала до целой планеты.

6 Новые направления исследований

6.1 Понимание причин возникновения видимого из космоса света на поверхности Земли

И хотя данные о ночных огнях являются полезным инструментом при изучении различных процессов развития, они обладают определенным набором ограничений. Так, ночные огни зависят от экономической активности, плотности населения, типа освещения, и норм, связанных с освещением, и все эти параметры варьируются как на уровне стран, так и на уровне отдельных регионов и даже городов. Эти различия затрудняют сравнения ночных огней, как в пространстве, так и во времени, и препятствуют пониманию точных соотношений между изменениями ночных огней и социально-экономическими процессами. Таким образом, становится очевидной необходимость проведения более систематического анализа причин возникновения видимого из космоса света в зависимости от географии и степени развития конкретных регионов. Нет сомнений, что ночные огни тесно взаимосвязаны с процессом урбанизации, изменениями численности населения, и объемами производства, как на уровне стран, так и на уровне регионов в высокоразвитых западных странах и быстрорастущем Китае. Однако нам известно не так много о частных случаях данных соотношений, особенно в контексте развивающихся стран и того, как эти соотношения варьируются на уровне отдельных регионов.

Дальнейшее исследование излучаемого света (или его отсутствия) может быть проведено посредством: 1) сочетания данных OLS или VIIRS с другими источниками данных дистанционных наблюдений; 2) статистических анализов, изучающих взаимосвязи между переменными, влияющими на ночные огни, и уделяющих большее внимание рассмотрению резко выделяющихся из общего ряда наблюдений; и 3) полевой работы и анализов конкретных территорий. Несмотря на то, что некоторые

из этих направлений уже фигурировали в определенных работах, у них сохраняется большой исследовательский потенциал.

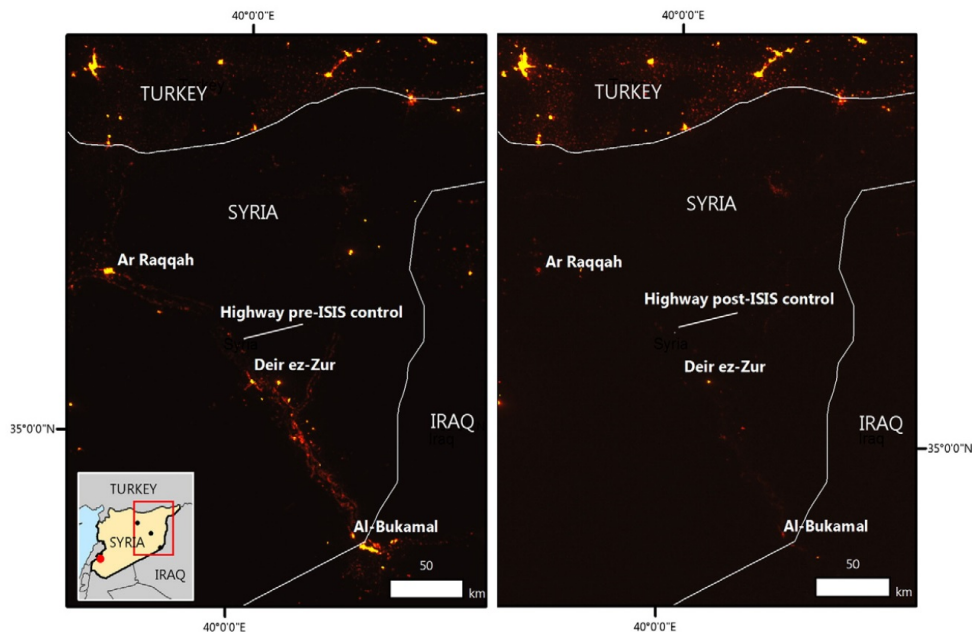


Рис. 6.1: Слева: композитное изображение VIIRS за апрель 2014, демонстрирующее северо-восток Сирии и стратегическое шоссе до установления над ним контроля ИГИЛ. Справа: композитное изображение VIIRS за апрель 2016, та же область наблюдения.

Во-первых, исследователям следует рассмотреть возможность интегрирования других массивов данных дистанционных наблюдений в модели, основанные на ночных огнях вместо того, чтобы использовать их исключительно в целях проверки. Некоторые исследования проводят проверку данных, полученных на основе снимков OLS и/или VIIRS с использованием фотографий, сделанных на Международной космической станции [36]; [78], или данных со спутника Ландсат [79]; [16]; [115]; [117]; [142]. Однако помимо использования различных типов снимков для проверки точности изображений ночных огней, представляется возможным использовать их в комбинации с массивами данных о ночных огнях в рамках одной модели для получения более подробной информации о факторах, обуславливающих появление видимых из космоса огней. Принимая за основу работу [18], в рамках которой снимки MODIS использовались для количественного выражения разницы в интенсивности излучаемого света между темным лесом, сельскохозяйственными угодьями, и городскими территориями, мы приходим к выводу о необходимости проведения большего количества исследований первого порядка с целью выведения закономерностей, объясняющих разницу в ночном освещении в разных секторах экономики и географических регионах. Добавление других источников данных дистанционных наблюдений, например радиометрии очень высокого разрешения (AVHRR), спутников Ландсат или Сентинел-2, оборудова-

ния MODIS, а также данных SPOT VEGETATION, позволит изучить влияние земного покрова на ночные огни. Например, один и тот же объем ночного освещения может быть менее заметен в лесу, чем в саванне или пустыне, но на данный момент лишь немногие исследования затрагивали вопросы взаимосвязи земного покрова и ночных огней. В заключение, исследователи могут позаимствовать методы работы, используемые специалистами по дистанционным наблюдениям с целью изучения физических процессов. Так, в исследовании [119] применили эмпирическую ортогональную функцию (EOF), часто используемую в океанографии и метеорологии, при изучении изменений ночных огней в Азии за десятилетний период времени. Этот подход позволил довольно точно описать пространственные и временные закономерности. Кроме того, он не требует оценки временных изменений посредством особых функциональных форм, например, линейной или синусоидной. Разнообразные стратегии моделирования также могут повысить эффективность многовременного анализа .

Во-вторых, дальнейшее изучение неоднородности и изменения соотношений между ночными огнями и индикаторами развития может более наглядно продемонстрировать модели взаимодействия социальных и экономических переменных при излучении света. Этот подход создаст альтернативу для существующих способов объяснения вариаций интенсивности света посредством коэффициента R^2 и адекватности статистических данных. Здесь также стоит обратиться к одной из ранних работ, в частности, исследованию Тоблера (1969), который на основе спутниковых снимков подтвердил, что соотношение между размером населенного пункта и численностью его населения варьируется от страны к стране. И хотя подобное соотношение в разных странах характеризуется практически одинаковым значением коэффициента R^2 , корреляция пропорциональности индивидуальна для каждой страны. Социальные факторы влияют на принципы освещения отдельно от показателей ВВП и численности населения. Так, сумма огней американского города численностью 10000 жителей, скорее всего, будет в три раза больше чем в аналогичном немецком городе, в то время как сумма огней 100.000-го города будет уже в пять раз выше, чем в немецком городе такого же размера. Это объясняется консервативной немецкой политикой в отношении использования уличного освещения, например, там не принято освещать автомобильные шоссе. В целом, несмотря на то, что социальные и культурные факторы, влияющие на ночное освещение, по-прежнему изучены недостаточно хорошо, попытки прогнозирования показателей ВВП, численности населения, и других переменных на основе данных о ночных огнях без учета подобных факторов могут привести к неточным результатам.

В дополнение к вышесказанному, необходимо отметить, что изучение взаимодействий, возникающих в случаях, когда влияние одной независимой переменной зависит от типа или уровня другой независимой переменной, также представляется весьма полезным и интересным. Например, в работе [111] моделируют взаимодействия с целью продемонстрировать, что военные конфликты негативно сказываются на темпах развития (выраженных косвенным показателем, а именно, уменьшением количества ночных огней) только в тех Африканских странах, которые страдают от этнических противоречий. Анализ вышеуказанных взаимодействий может ускорить изучение со-

отношения между ночными огнями и инвестициями в основной капитал, которые понимаются как стоимость новых инфраструктурных объектов, расширения и ремонта физического капитала (например, зданий и оборудования). Этот анализ также поможет при ответе на вопрос, зависит ли данное соотношение от того, какая отрасль в экономике региона является доминирующей.

6.2 VIIRS: новые предметы исследований, регионы, и временные интервалы

Основными направлениями исследований, которые могут извлечь максимум из возможностей сенсора VIIRS, являются развитие инфраструктуры, изучение Арктики, и рассмотрение различных видов деятельности на временном отрезке менее одного года. С точки зрения развития инфраструктуры, если сбудутся прогнозы о том, что за следующие 40 лет человечество построит больше инфраструктурных объектов, чем за предыдущие четыре столетия [67], то данные VIIRS как нельзя лучше подойдут для отслеживания и количественного выражения сопутствующего исходящего света. Ввиду низкого разрешения, данные OLS могут использоваться при моделировании развития транспортных артерий, например, шоссе и железных дорог [85]. В то же время, снимки VIIRS могут продемонстрировать влияние этих инфраструктурных объектов на социально-экономическую обстановку в непосредственном приближении, например, оценить негативное влияние выбросов CO₂ в районе шоссе [106]. Авторы [40] предлагают использовать разновременные снимки ночных огней для картографирования инфраструктуры, однако более интересным способом использования данных снимков представляется отслеживание и прогнозирование интенсивности использования инфраструктурных объектов, а также их социального, экономического, и экологического влияния. В сочетании с сетевыми моделями на основе GIS [69], подобные исследования могут помочь при количественной оценке влияния развития сетевой инфраструктуры, которое лежит в основе процессов урбанизации [52].

С географической точки зрения, одним из последних перспективных направлений изучения ночных огней является исследование с помощью снимков VIIRS отдаленных и труднодоступных регионов, таких как Арктика, Амазония, и открытое море. И хотя система OLS может собирать данные во время полярной ночи, на широтах за полярным кругом эти данные искажаются под влиянием полярных сияний и значительных отличий в снежном покрове [29]; [57]. Страны, расположенные в северных широтах, например Канада, Швеция, Норвегия, Финляндия, и Исландия, демонстрируют аномально высокие уровни освещения относительно численности их населения [34]. Исследователи, использующие снимки VIIRS, по-прежнему вынуждены мириться с этими сложностями, однако сенсор VIIRS гораздо точнее фиксирует светоизлучающую антропогенную активность в полярных регионах по сравнению с системой OLS [123]. Авторы [57] отмечают, что всего 0.036% от общего населения планеты проживает в Арктике, однако, поскольку экономическая активность растет в областях, подверженных влиянию глобального потепления, данные VIIRS могут содержать полезную

информацию о темпах развития данных территорий. В заключение, многочисленные технические преимущества сенсора VIIRS и отсутствие платы за использование предоставленных им данных предоставляет живущим в полярных регионах специалистам по обработке снимков ночных огней использовать полученную с их помощью информацию для спасения людей. Авторы [123] приводят пример того, как снимки VIIRS использовались практически в режиме реального времени для спасения рыболовецкого судна, находившегося в опасности у берегов Аляски. В этой связи, сенсор VIIRS расширяет горизонты изучения Арктики и практического применения полученных с его помощью данных на благо человечества.

С временной точки зрения, отсутствие необходимости оплачивать ежедневные и ежемесячные снимки, сделанные при помощи DNB, открывает новые возможности для исследований. И хотя облачный покров все еще доставляет неудобства при работе с ежедневными снимками, некоторые исследователи уже используют данные VIIRS для иллюстрации ежемесячных и сезонных изменений в антропогенной активности сопряженной с излучением света. Так, предметами изучения стали наличие праздничного освещения [112] и движение самолетов и пассажиропотоков в аэропортах ([95]). Данные VIIRS также могут использоваться при обнаружении краткосрочной антропогенной активности сопряженной с излучением света, которая, тем не менее, обладает серьезным социальным или экологическим влиянием, например, нелегальных сталелитейных заводов, наличие которых зафиксировано на территории Китая [108], или нелегальной ловли рыбы. В своем исследовании, авторы [90] не только показывают, как ночные снимки VIIRS помогают обнаружить светящихся кальмаров и рыболовецкие суда, но и утверждают, что сверка данных о ночных огнях с записями в системе мониторинга судов поможет находить корабли, занимающиеся незаконной ловлей рыбы. Такие суда будут излучать свет, но не будут передавать сигнал в систему мониторинга. Как и в случае с другими массивами данных дистанционных наблюдений, геополитические последствия использования подобных снимков с целью раскрытия подпольной или нелегальной деятельности могут быть весьма серьезными [51]. Учитывая вышеназванные сложности, исследователи должны относиться с осторожностью, но не отказываться от использования данных о ночных огнях в целях мониторинга краткосрочных периодов активности в различных уязвимых районах, от территорий, охваченных военным конфликтом, до вод открытого моря.

7 Заключение

Разновременные данные OLS и VIIRS позволяют проводить исследования социально-экономических процессов, таких как урбанизация, изменение численности населения, и колебания экономической активности в глобальном масштабе. При наличии корректировки временных различий (например, взаимной калибровки сенсоров или контроля фиксированных годовых эффектов) и должном внимании к насыщению и помутнению, разновременные данные OLS могут служить надежным косвенным индикатором роста данных параметров. Замедление процессов урбанизации, уменьшение числен-

ности населения, или снижение экономической активности обнаруживается гораздо труднее, поскольку не всегда негативные демографические тенденции или экономический кризис сопровождаются уменьшением количества ночных огней. Таким образом, в ходе последующих исследований, необходимо изучить причины возникновения видимого из космоса света и попытаться ответить на вопрос, почему определенные территории, процессы, и виды деятельности характеризуются отсутствием видимого света. Основные перспективы будущих исследований сопряжены с совмещением снимков ночных огней и других источников данных дистанционных наблюдений в рамках одной модели, проведением более подробных статистических анализов, направленных на изучение взаимодействий между разными параметрами и резко выделяющихся из общего ряда показателей, а также организацией полевых исследований и налаживанием междисциплинарного сотрудничества.

Благодаря серьезному увеличению пространственного и радиометрического разрешения, сенсор VIIRS предоставляет гораздо более четкие снимки ночной поверхности Земли в сравнении с предыдущим поколением оборудования, системой OLS. Негативное влияние эффектов насыщения и помутнения существенно снизилось, возможность оценки реальной яркости огней и наличие бортовой калибровки повышают качество сопоставлений изменений ночных огней с течением времени. Способность сенсора обнаружить и зафиксировать тусклые огни также положительно влияет на точность оценок колебаний численности населения и экономической активности в развивающихся странах. Бесплатный доступ к ежедневно поступающим данным VIIRS и создание ежемесячных композитных изображений силами NOAA предоставляют исследователям возможность изучать соотношения между ночными огнями и различными социально-экономическими параметрами на гораздо более коротких временных отрезках по сравнению с системой OLS. Потенциальное совмещение данных VIIRS и OLS с целью расширить сравнительную базу снимков ночных огней [114] значительно расширит горизонты будущих разновременных исследований. С помощью системы OLS, сенсора VIIRS, и их преемника, спутника Joint Polar Satellite System-1 (JPSS-1), исследователи могут отслеживать и изучать антропогенную активность, прежде скрытую под покровом ночи.

Список литературы

- [1] Agnew, J., Gillespie, T.W., Gonzalez, J., Min, B., 2008. Baghdad nights: evaluating the US military “surge” using nighttime light signatures. *Environ. Plan. A* 40:2285-2295. <http://dx.doi.org/10.1068/a41200>.
- [2] Alesina, A., Michalopoulos, S., Papaioannou, E., 2016. Ethnic inequality. *J. Polit. Econ.* 124: 428-488. <http://dx.doi.org/10.1086/685300>.
- [3] Amaral, S., Monteiro, A.M., Camara, G., Quintanilha, JA, 2006. DMSP/OLS night-time light imagery for urban population estimates in the Brazilian Amazon. *Int. J. Remote Sens.* 27 (5) , 855-870.

- [4] Balk, D., 2009. More than a name: why is global urban population mapping a GRUMPy proposition? In: Gamba, Paolo, Herold, Martin (Eds.), *Global Mapping of Human Settlement: Experiences, Datasets, and Prospects*. CRC Press, Boca Raton:pp. 145-161 <http://dx.doi.org/10.1201/9781420083408-c7>.
- [5] Baugh, K., Elvidge, C.D., Ghosh, T., Ziskin, D., 2010. Development of a 2009 stable lights product using DMSP-OLS data. *Proc. Asia-Pacific Adv. Netw.* 30:114-130. <http://dx.doi.org/10.7125/APAN.30.17>.
- [6] Alvarez-Bemos, N.L., Pares-Ramos, I.K., Aide, T.M., 2013. Contrasting patterns of urban expansion in Colombia, Ecuador, Peru, and Bolivia between 1992 and 2009. *Ambio* 42: 29-40. <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-012-0344-8>.
- [7] Bennie, J., Davies, T.W., Duffy, J.P., Inger, R., Gaston, K.J., 2014. Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights. *Sci. Rep.* 4: 1-6. <http://dx.doi.org/10.1038/srep03789>.
- [8] Bleakley, H., Lin, J., 2012. Portage and path dependence. *Q. J. Econ.* 127:587-644. <http://dx.doi.org/10.1093/qje/qjs011>.
- [9] Brenner, N., Schmid, C., 2014. The “Urban Age” in question. *Int. J. Urban Reg. Res.* 38: 731-755. <http://dx.doi.org/10.1111/1468-2427.12115>.
- [10] Archila Bustos, M.F., Hall, O., Andersson, M., 2015. Nighttime lights and population changes in Europe 1992-2012. *Ambio*44:653-665. <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-015-0646-8>.
- [11] Cahoon, D.R., Stocks, B.J., Levine, J.S., Cofer, W.R.I., O’Neill, K.P., 1992. Seasonal distribution of African savanna fires. *Nature* 359,812-815.
- [12] Cao, X., Chen, J., Imura, H., Higashi, O., 2009. A SVM-based method to extract urban areas from DMSP-OLS and SPOTVGT data. *Remote Sens. Environ.* 113:2205-2209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.001>.
- [13] Cao, C., Shao, X., Uprety, S., 2013. Detecting light outages after severe summer storms using the S-NPP/VIIIRS Day/Night Band radiances. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 10:1582-1586. <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2013.2262258>.
- [14] Cao, C., Bai, Y., 2014. Quantitative analysis of VIIRS DNB nightlight point source for light power estimation and stability monitoring. *Remote Sens.* 6:11915-11935. <http://dx.doi.org/10.3390/rs61211915>.
- [15] Cao, X., Wang, J., Chen, J., Shi, F., 2014. Spatialization of electricity consumption of China using saturation-corrected DMSP-OLS data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 28,193-200.

- [16] Castrence, M., Nong, D., Tran, C., Young, L., Fox, J., 2014. Mapping urban transitions using multi-temporal Landsat and DMSP-OLS nighttime lights imagery of the Red River Delta in Vietnam. *Land* 3:148-166. <http://dx.doi.org/10.3390/land3010148>.
- [17] Cauwels, P., Pestalozzi, N., Sornette, D., 2014. Dynamics and spatial distribution of global nighttime lights. *EPJ Data Sci.* 3:1-26. <http://dx.doi.org/10.1140/epjds19>.
- [18] Ceola, S., Laio, F., Montanari, A., 2015. Human impacted waters: new perspectives from global high resolution monitoring. *Water Resour. Res.* 51:7064-7079. <http://dx.doi.org/10.1002/2015WR017482>.
- [19] Chand, T.R.K., Badarinath, K.V.S., Elvidge, C.D., Tuttle, B.T., 2009. Spatial characterization of electrical power consumption patterns over India using temporal DMSP-OLS nighttime satellite data. *Int. J. Remote Sens.* 30:647-661. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160802345685>.
- [20] Chen, X., Nordhaus, W.D., 2011. Using luminosity data as a proxy for economic statistics. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108:8589-8594. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1017031108>.
- [21] Chen, X., Nordhaus, W.D., 2015. A test of the new VIIRS lights data set: population and economic output in Africa. *Remote Sens.* 7:4937-4947. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70404937>.
- [22] Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C.D., Baugh, K.E., 2000. The artificial night sky brightness mapped from DMSP operational linescan system measurements. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 318:641-657. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03562.x>.
- [23] Cohen, B., 2006. Urbanization in developing countries: current trends, future projections, and key challenges for sustainability. *Technol. Soc.* 28:63-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techsoc.2005.10.005>.
- [24] Croft, T., 1978. Nighttime images of the earth from space. *Sci. Am.* 239,86-98.
- [25] Doll, C.N.H., Muller, J., Elvidge, C.D., 2000. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions. *Ambio* 29:157-162. <http://dx.doi.org/10.1579/0044-7447-29.3.157>.
- [26] Doll, C.N.H., Muller, J.-P., Morley, J.G., 2006. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery. *Ecol. Econ.* 57:75-92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.007>.
- [27] Doll, C.N.H., Pachauri, S., 2010. Estimating rural populations without access to electricity in developing countries through night-time light satellite imagery. *Energy Policy* 38: 5661-5670. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.014>.

- [28] Doll, C.N., 2008. CIESIN thematic guide to night-time light remote sensing and its applications. Center for International Earth Science Information Network of Columbia University, Palisades, NY.
- [29] Ebener, S., Murray, C., Tandon, A., Elvidge, C., 2005. From wealth to health: modelling the distribution of income per capita at the sub-national level using night-time light imagery. *Int. J. Health Geogr.* 4:1 -17. <http://dx.doi.org/10.1186/1476-072X^5>.
- [30] Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Kihn, EA, Kroehl, H.W., Davis, E.R., 1997a. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP operational linescan system. *Photogramm Eng. Remote. Sens.* 63, 727-734.
- [31] Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Hobson, V.R., Kihn, E., Kroehl, H.W., Davis, E.R., Coceros, D., 1997b. Satellite inventory of human settlements using nocturnal radiation emissions: a contribution for the global tool chest. *Glob. Chang. Biol.* 3,387-395.
- [32] Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Kihn, E.A., Kroehl, H.W., Davis, E.R., Davis, C.W., 1997c. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption. *Int. J. Remote Sens.* 18:1373-1379. <http://dx.doi.org/10.1080/014311697218485>.
- [33] Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Dietz, J.B., Bland, T., Sutton, P.C., Kroehl, H.W., 1999. Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements. *Remote Sens. Environ.* 68:77-88. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00098-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00098-4).
- [34] Elvidge, C.D., Imhoff, M.L., Baugh, K.E., Hobson, V.R., Nelson, I., Safran, J., Dietz, J.B., Tuttle, B.T., 2001. Night-time lights of the world: 1994-1995. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 56:81-99. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716\(01\)00040-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716(01)00040-5).
- [35] Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Safran, J., Tuttle, B.T., Howard Ara, T., Hayes, P.J., Jantzen, J., Erwin, E.H., 2005. Preliminary results from nighttime lights change detection. *Int. Arch. Photogramm. Remote. Sens. Spat. Inf. Sci.* 36,14-16.
- [36] Elvidge, C.D., Cinzano, P., Pettit, D.R., Arvesen, J., Sutton, P., Small, C., Nemani, R., Longcore, T., Rich, C., Safran, J., Weeks, J., Ebener, S., 2007. The Nightsat mission concept. *Int. J. Remote Sens.* 28:2645-2670. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160600981525>.
- [37] Elvidge, C.D., Ziskin, D., Baugh, K.E., Tuttle, B.T., Ghosh, T., Pack, D.W., Erwin, E.H., Zhizhin, M., 2009. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data. *Energy* 2:595-622. <http://dx.doi.org/10.3390/en20300595>.

- [38] Elvidge, C.D., Baugh, K., Zhizhin, M., Hsu, F.C., 2013a. Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights. *Proc. Asia-Pacific Adv. Netw.* 35:62-69. <http://dx.doi.org/10.7125/APAN.35.7>.
- [39] Elvidge, C.D., Zhizhin, M., Hsu, F.-C., Baugh, K., 2013b. VIIRS Nightfire: satellite pyrometry at night. *Remote Sens.* 5:4423-4449. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5094423>.
- [40] Elvidge, C.D., Hsu, F.-C., Baugh, K., Ghosh, T., 2014. National trends in satellite-observed lighting: 1992-2009. In: Weng, Q. (Ed.), *Global Urban Monitoring and Assessment Through Earth Observation*. Boca Raton, pp. 97-120.
- [41] Elvidge, C.D., Zhizhin, M., Baugh, K., Hsu, F.-C., Ghosh, T., 2015. Methods for global survey of natural gas flaring from visible infrared imaging radiometer suite data. *Energy* 9: 1-16. <http://dx.doi.org/10.3390/en9010014>.
- [42] Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C.C.M., Elvidge, C.D., Baugh, K., Portnov, B.A., Rybnikova, N.A., Furgoni, R., 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Sci. Adv.* 1-26. <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1600377>.
- [43] Fan, J., Ma, T., Zhou, C., Zhou, Y., Xu, T., 2014. Comparative estimation of urban development in China's cities using socioeconomic and DMSP/OLS night light data. *Remote Sens.* 6:7840-7856. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6087840>.
- [44] Filho, C.R.D.S., Zullo Jr.,J., Elvidge, C.D., 2004. Brazil's 2001 energy crisis monitored from space. *Int. J. Remote Sens.* 25:2475-2482. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160410001662220>.
- [45] Forbes, D.J., 2013. Multi-scale analysis of the relationship between economic statistics and DMSP-OLS night light images. *GIScience & Remote Sens.* 50 (5) , 483-499.
- [46] Froking, S., Milliman, T., Seto, K.C., Friedl, M.A., 2013. A global fingerprint of macro-scale changes in urban structure from 1999 to 2009. *Environ. Res. Lett.* 8:024004. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024004>.
- [47] Gao, B., Huang, Q., He, C., Ma, Q., 2015. Dynamics of urbanization levels in China from 1992 to 2012: perspective from DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sens.* 7: 1721 -1735. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70201721>.
- [48] Gaston, K.J., Duffy, J.P., Bennie, J., 2015. Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system. *Conserv. Biol.* 29:1132-1141. <http://dx.doi.org/10.1111/cobi.12462>.
- [49] Geldmann, J., Joppa, L.N., Burgess, N.D., 2014. Mapping change in human pressure globally on land and within protected areas. *Conserv. Biol.* 28 (6) , 1604-1616.

- [50] Gennaioli, N., La Porta, R., De Silanes, F.L., Shleifer, A., 2014. Growth in regions. *J. Econ. Growth* 19 (3) , 259-309.
- [51] Gleason, C.J., Hamdan, A.N., 2015. Crossing the (Watershed) Divide: Satellite Data and the Changing Politics of International River Basins. <http://dx.doi.org/10.1111/geoj.12155>.
- [52] Graham, S., Marvin, S., 2001. *Splintering Urbanism: Networked Infrastructures, Technological Mobilities and the Urban Condition*. Psychology Press, New York.
- [53] Hara, M., Okada, S., Yagi, H., Moriyama, T., Shigehara, K., Sugimori, Y., 2010. Progress for stable artificial lights distribution extraction accuracy and estimation of electric power consumption by means of DMSP/OLS nighttime imagery. *Int. J. Remote Sens. Earth Sci.* 1,31-42.
- [54] He, C., Li, J., Chen, J., Shi, P., Chen, J., Pan, Y., Li, J., Zhuo, L., Toshiaki, I., 2006. The urbanization process of Bohai rim in the 1990s by using DMSP/OLS data. *J. Geogr. Sci.* 16: 174-182. <http://dx.doi.org/10.1007/s11442-006-0205-0>.
- [55] He, C., Ma, Q., Li, T., Yang, Y., Liu, Z., 2012. Spatiotemporal dynamics of electric power consumption in Chinese mainland from 1995 to 2008 modeled using DMSP/OLS stable nighttime lights data. *J. Geogr. Sci.* 22:125-136. <http://dx.doi.org/10.1007/s11442-012-0916-3>.
- [56] Henderson, M., Yeh, E.T., Gong, P., Elvidge, C., Baugh, K., 2003. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 24: 595-609. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160304982>.
- [57] Henderson, J.V., Storeygard, A., Weil, D.N., 2012. Measuring economic growth from outer space. *Am. Econ. Rev.* 102:994-1028. <http://dx.doi.org/10.1257/aer.102.2.994>.
- [58] Hillger, D., Kopp, T., Lee, T., Lindsey, D., Seaman, C., Miller, S., Solbrig, J., Kidder, S., Bachmeier, S., Jasmin, T., Rink, T., 2013. First-light imagery from Suomi NPP VIIRS. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94:1019-1029. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00097.1>.
- [59] Hodler, R., Raschky, P., 2014. Regional favoritism. *Quarterly J. Econ* 129, 995-1033.
- [60] Hsu, F.-C., Baugh, K., Ghosh, T., Zhizhin, M., Elvidge, C., 2015. DMSP-OLS radiance calibrated nighttime lights time series with intercalibration. *Remote Sens.* 7:1855-1876. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70201855>.
- [61] Huang, Q., Yang, X., Gao, B., Yang, Y., Zhao, Y., 2014. Application of DMSP/OLS nighttime light images: a meta-analysis and a systematic literature review. *Remote Sens.* 6: 6844-6866. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6086844>.

- [62] Imhoff, M.L., Lawrence, W.T., Stutzer, D.C., Elvidge, C.D., 1997. A technique for using composite DMSP/OLS “city lights” satellite data to map urban area. *Remote Sens. Environ.* 61:361-370. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00046-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00046-1).
- [63] Jean, N., Burke, M., Xie, M., Davis, W.M., Lobell, D.B., Ermon, S., 2016. Combining satellite imagery and machine learning to predict poverty. *Science* 353:790-794. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aaf7894>.
- [64] Jiang, L., Deng, X., Seto, K.C., 2012. Multi-level modeling of urban expansion and cultivated land conversion for urban hotspot counties in China. *Landsc. Urban Plan.* 108 (2) , 131-139.
- [65] Katz, Y., Levin, N., 2016. Quantifying urban light pollution — a comparison between field measurements and EROS-B imagery. *Remote Sens. Environ.* 177:65-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.017>.
- [66] Keola, S., Andersson, M., Hall, O., 2015. Monitoring economic development from space: using nighttime light and land cover data to measure economic growth. *World Dev.* 66:322-334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.08.017>.
- [67] Khanna, P., 2016. *Connectography: Mapping the Future of Global Civilization*. Random House, New York.
- [68] Kohiyama, M., Hayashi, H., Maki, N., Higashida, M., Kroehl, H.W., Elvidge, C.D., Hobson, V.R., 2004. Early damaged area estimation system using DMSP-OLS night-time imagery. *Int. J. Remote Sens.* 25:2015-2036. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160310001595033>.
- [69] Kotavaara, O., Antikainen, H., Rusanen, J., 2011. Population change and accessibility by road and rail networks: GIS and statistical approach to Finland 1970-2007. *J. Transp. Geogr.* 19:926-935. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.10.013>.
- [70] Kramer, H., 1994. *Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors*. second ed. Verlag, Berlin/New York.
- [71] Kyba, C.M., Wagner, J.M., Kuechly, H.U., Walker, C.E., Elvidge, C.D., Falchi, F., Ruhtz, T., Fischer, J., Holker, F., 2013. Citizen science provides valuable data for monitoring global night sky luminance. *Sci. Report.* 3:1835. <http://dx.doi.org/10.1038/srep01835>.
- [72] Kyba, C.M., Garz, S., Kuechly, H., de Miguel, A., Zamorano, J., Fischer, J., Holker, F., 2015. High-resolution imagery of earth at night: new sources, opportunities and challenges. *Remote Sens.* 7:1-23. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70100001>.

- [73] Lee, T.E., Miller, S.D., Turk, F.J., Schueler, C., Julian, R., Deyo, S., Dills, P., Wang, S., 2006. The NPOESS VIIRS Day/Night visible sensor. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 87:191-199. [http:// dx.doi.org/10.1175/BAMS-87-2-191](http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-87-2-191).
- [74] Lees, L., 2002. Rematerializing geography: the “new” urban geography. *Prog. Hum. Geogr.* 26:101-112. <http://dx.doi.org/10.1191/0309132502ph358pr>.
- [75] Letu, H., Hara, M., Yagi, H., Naoki, K., Tana, G., Nishio, F., Shuhei, O., 2010. Estimating energy consumption from night-time DMPS/OLS imagery after correcting for saturation effects. *Int. J. Remote Sens.* 31:4443-4458. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160903277464>.
- [76] Letu, H., Hara, M., Tana, G., Nishio, F., 2012. A saturated light correction method for DMSP/ OLS nighttime satellite imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 50:389-396. [http:// dx.doi.org/10.1109/TGRS.2011.2178031](http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2011.2178031).
- [77] Letu, H., Hara, M., Tana, G., Bao, Y., Nishio, F., 2015. Generating the nighttime light of the human settlements by identifying periodic components from DMSP/OLS satellite imagery. *Environ. Sci. Technol.* 49:10503-10509. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b02471>.
- [78] Levin, N., Duke, Y., 2012. High spatial resolution night-time light images for demographic and socio-economic studies. *Remote Sens. Environ.* 119:1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.005>.
- [79] Levin, N., Phinn, S., 2016. Illuminating the capabilities of Landsat 8 for mapping night lights. *Remote Sens. Environ.* 182:27-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.021>.
- [80] Li, X., Ge, L., Chen, X., 2013a. Detecting Zimbabwe’s decadal economic decline using nighttime light imagery. *Remote Sens.* 5:4551-4570. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5094551>.
- [81] Li, X., Chen, F., Chen, X., 2013b. Satellite-observed nighttime light variation as evidence for global armed conflicts. *IEEE J. Seletect Topics in Applied Earth Observations and Remote Sens.* 6, 2302-2315.
- [82] Li, X., Xu, H., Chen, X., Li, C., 2013c. Potential of NPP-VIIRS nighttime light imagery for modeling the regional economy of China. *Remote Sens.* 5 (6) , 3057-3081.
- [83] Li, X., Li, D., 2014. Can night-time light images play a role in evaluating the Syrian Crisis? *Int. J. Remote Sens.* 35:6648-6661. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2014.971469>.

- [84] Li, X., Zhang, R., Huang, C., Li, D., 2015. Detecting 2014 northern Iraq insurgency using night-time light imagery. *Int. J. Remote Sens.* 36:3446-3458. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2015.1059968>.
- [85] Liang, H., Tanikawa, H., Matsuno, Y., Dong, L., 2014. Modeling in-use steel stock in China's buildings and civil engineering infrastructure using time-series of DMSP/OLS nighttime lights. *Remote Sens.* 6:4780-4800. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6064780>.
- [86] Liu, Zhifeng, He, Chunyang, Yang, Yang, 2011. Mapping urban areas by performing systematic correction for DMSP/OLS Nighttime Lights Time Series in China from 1992 to 2008. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. IEEE International, pp. 1858-1861 (IEEE, 2011).
- [87] Liu, Z., He, C., Zhang, Q., Huang, Q., Yang, Y., 2012. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008. *Landsc. Urban Plan.* 106:62-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.013>.
- [88] Liu, Q., Yang, Y., Tian, H., Zhang, B., Gu, L., 2014. Assessment of human impacts on vegetation in built-up areas in China based on AVHRR, MODIS and DMSP-OLS nighttime light data, 1992-2010. *Chin. Geogr. Sci.* 24:231-244. <http://dx.doi.org/10.1007/s11769-013-0645-2>.
- [89] Liu, Y., Wang, Y., Peng, J., Du, Y., Liu, X., Li, S., Zhang, D., 2015a. Correlations between urbanization and vegetation degradation across the world's metropolises using DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sens.* 7:2067-2088. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70202067>.
- [90] Liu, Y., Saitoh, S.-I., Hirawake, T., Igarashi, H., Ishikawa, Y., 2015b. Detection of squid and Pacific saury fishing vessels around Japan using VIIRS Day/Night Band data. *Proc. Asia-Pacific Adv. Netw.* 39:28-39. <http://dx.doi.org/10.7125/APAN.39>.
- [91] Lo, C.P., 2002. Urban indicators of China from radiance-calibrated digital DMSP-OLS nighttime images. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 92:225-240. <http://dx.doi.org/10.1111/1467-8306.00288>.
- [92] Ma, T., Zhou, C., Pei, T., Haynie, S., Fan, J., 2012. Quantitative estimation of urbanization dynamics using time series of DMSP/OLS nighttime light data: a comparative case study from China's cities. *Remote Sens. Environ.* 124:99-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.018>.
- [93] Ma, T., Zhou, Y., Wang, Y., Zhou, C., Haynie, S., Xu, T., 2014a. Diverse relationships between Suomi-NPP VIIRS night-time light

- and multi-scale socioeconomic activity. *Remote Sens. Lett.* 5:652-661. <http://dx.doi.org/10.1080/2150704X.2014.953263>.
- [94] Ma, L., Wu, J., Li, W., Peng, J., Liu, H., 2014b. Evaluating saturation correction methods for DMSP/OLS nighttime light data: a case study from China's cities. *Remote Sens.* 6: 9853-9872. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6109853>.
- [95] Ma, T., Zhou, C., Pei, T., Haynie, S., Fan, J., 2014c. Responses of Suomi-NPP VIIRS-derived nighttime lights to socioeconomic activity in China's cities. *Remote Sens. Lett.* 5: 165-174. <http://dx.doi.org/10.1080/2150704X.2014.890758>.
- [96] Mellander, C., Lobo, J., Stolarick, K., Matheson, Z., 2015. Night-time light data: a good proxy measure for economic activity? *PloS one* 10 (10) , e0139779.
- [97] Michalopoulos, S., Papaioannou, E., 2013. Pre-Colonial Ethnic Institutions and Contemporary African Development. *Econometrica* 81 (1) , 113-152.
- [98] Michalopoulos, S., Papaioannou, E., 2014. National institutions and subnational development in Africa. *Q. J. Econ.* 129 (1) , 151-213.
- [99] Miller, S.D., Mills, S.P., Elvidge, C.D., Lindsey, D.T., Lee, T.F., Hawkins, J.D., 2012. Suomi satellite brings to light a unique frontier of nighttime environmental sensing capabilities. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109:15706-15711. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1207034109>.
- [100] Miller, S.D., Straka, W., Mills, S.P., Elvidge, C.D., Lee, T.F., Solbrig, J., Walther, A., Heidinger, A.K., Weiss, S.C., 2013. Illuminating the capabilities of the Suomi National Polar-orbiting Partnership (NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) day/night band. *Remote Sens.* 5:6717-6766. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5126717>.
- [101] Mills, S., Weiss, S., Liang, C., 2013. VIIRS day/night band (DNB) stray light characterization and correction. *Proc. SPIE* 8866. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2023107>.
- [102] Min, B., Gaba, K.M., Sarr, O.F., Agalassou, A., 2013. Detection of rural electrification in Africa using DMSP-OLS night lights imagery. *Int. J. Remote Sens.* 34:8118-8141. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.833358>.
- [103] Min, B., Gaba, K., 2014. Tracking electrification in Vietnam using nighttime lights. *Remote Sens.* 6:9511-9529. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6109511>.
- [104] Molthan, A., Jedlovec, G., 2013. Satellite observations monitor outages from superstorm Sandy. *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 94:53-54. <http://dx.doi.org/10.1002/2013EO050001>.

- [105] Nordhaus, W., Chen, X., 2015. A sharper image? Estimates of the precision of nighttime lights as a proxy for economic statistics. *J. Econ. Geogr.* 15:217-246. <http://dx.doi.org/10.1093/jeg/lbu010>.
- [106] Ou, J., Liu, X., Li, X., Li, M., Li, W., 2015. Evaluation of NPP-VIIRS nighttime light data for mapping global fossil fuel combustion CO2 emissions: a comparison with DMSP- OLS nighttime light data. *PLoS One* <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0138310>.
- [107] Pandey, B., Joshi, P.K., Seto, K.C., 2013. Monitoring urbanization dynamics in India using DMSP/OLS night time lights and SPOT-VGT data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 23: 49-61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.11.005>.
- [108] Panifilova, E.A., 2016. Corruption indices for Russian Regions. In: Shacklock, A., Galtung, F. (Eds.), *Measuring Corruption*. Routledge, London and New York, pp. 189-203.
- [109] Pares-Ramos, I.K., Alvarez-Bemos, N.L., Aide, T.M., 2013. Mapping urbanization dynamics in major cities of Colombia, Ecuador, Peru, and Bolivia using night-time satellite imagery. *Land 2* (1) , 37-59.
- [110] Raupach, M.R., Rayner, P.J., Paget, M., 2010. Regional variations in spatial structure of nightlights, population density and fossil-fuel CO2 emissions. *Energy Policy* 38: 4756-4764. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.021>.
- [111] Rohner, D., Thoenig, M., Zilibotti, F., 2013. Seeds of distrust: conflict in Uganda. *J. Econ. Growth* 18:217-252. <http://dx.doi.org/10.1007/s10887-013-9093-1>.
- [112] Roman, M.O., Stokes, E.C., 2014. Holidays in lights: tracking cultural patterns in demand for energy services. *Earth's Future* 3:182-205. <http://dx.doi.org/10.1002/2014EF000285>.
- [113] Seaman, C.J., Miller, S.D., 2015. A dynamic scaling algorithm for the optimized digital display of VIIRS Day/Night Band imagery. *Int. J. Remote Sens.* 36:1839-1854. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2015.1029100>.
- [114] Shao, X., Cao, C., Zhang, B., Qiu, S., Elvidge, C., Von Hendy, M., 2014. Radiometric Calibration of DMSP-OLS Sensor Using VIIRS Day/Night Band 9264, 92640A1-92640A8. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2068999>.
- [115] Shi, K., Chang, H., Bailang, Y., Bing, Y., Yixiu, H., Jianping, W., 2014. Evaluation of NPP-VIIRS night-time light composite data for extracting built-up urban areas. *Remote Sens. Lett.* 5:358-366. <http://dx.doi.org/10.1080/2150704x.2014.905728>.

- [116] Shi, K., Yu, B., Hu, Y., Huang, C., Chen, Y., Huang, Y., Chen, Z., Wu, J., 2015. Modeling and mapping total freight traffic in China using NPP-VIIRS nighttime light composite data. *GIScience Remote Sens.* 52:274-289. <http://dx.doi.org/10.1080/15481603.2015.1022420>.
- [117] Small, C., Pozzi, F., Elvidge, C., 2005. Spatial analysis of global urban extent from DMSP- OLS night lights. *Remote Sens. Environ.* 96:277-291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.02.002>.
- [118] Small, C., Elvidge, C.D., Balk, D., Montgomery, M., 2011. Spatial scaling of stable night lights. *Remote Sens. Environ.* 115:269-280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.021>.
- [119] Small, C., Elvidge, C.D., 2013. Night on earth: mapping decadal changes of anthropogenic night light in Asia. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 22:40-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.02.009>.
- [120] Small, C., Sousa, D., 2016. Humans on Earth; Global Extents of Anthropogenic Land Cover from Remote Sensing. *Anthropocene.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2016.04.003>.
- [121] Stern, P., 1993. A second environmental science: human-environment interactions. *Science* 260,1897-1899.
- [122] Stevens, F.R., Gaughan, A.E., Linard, C., Tatem, A.J., 2015. Disaggregating census data for population mapping using random forests with remotely-sensed and ancillary data. *PLoS One* 10, e0107042. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0107042>.
- [123] Straka, W., Seaman, C., Baugh, K., Cole, K., Stevens, E., Miller, S., 2015. Utilization of the Suomi National Polar-orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band for Arctic ship tracking and fisheries management. *Remote Sens.* 7:971-989. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70100971>.
- [124] Su, Y., Chen, X., Wang, C., Zhang, H., Liao, J., Ye, Y., Wang, C., 2015. A new method for extracting built-up urban areas using DMSP-OLS nighttime stable lights: A case study in the Pearl River Delta, southern China. *GIScience & Remote Sens.* 52 (2) , 218-238.
- [125] Sullivan III, W.T., 1989. A10km resolution image of the entire night-time Earth based on cloud-free satellite photographs in the 400-1100 nm band. *Remote Sens.* 10 (1) , 1-5.
- [126] Sutton, P., 1997. Modeling population density with night-time satellite imagery and GIS. *Comput. Environ. Urban. Syst.* 21:227-244. [http://dx.doi.org/10.1016/S0198-9715\(97\)01005-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0198-9715(97)01005-3).

- [127] Sutton, P., Roberts, D., Elvidge, C., Baugh, K., 2001. Census from heaven: an estimate of the global human population using night-time satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 22: 3061-3076. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160010007015>.
- [128] Sutton, P., Costanza, R., 2002. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation. *Ecol. Econ.* 41:509-527. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00097-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00097-6).
- [129] Sutton, P., Elvidge, C., Ghosh, T., 2007. Estimation of gross domestic product at sub-national scales using nighttime satellite imagery. *Int. J. Ecol. Econ. Stat.* 8, 5-21.
- [130] Tan, M., 2015. Urban growth and rural transition in China based on DMSP/OLS nighttime light data. *Sustainability* 7, 8768-8781.
- [131] Tanaka, K., Keola, S., 2016. Shedding light on the shadow economy: a nighttime light approach. *J. Dev. Stud.* <http://dx.doi.org/10.1080/00220388.2016.1171845>.
- [132] Tian, J., Zhao, N., Samson, E.L., Wang, S., 2014. Brightness of nighttime lights as a proxy for freight traffic. A Case Study of China 7, 206-212.
- [133] Tibbetts, J., 2002. Coastal cities: living on the edge. *Environ. Health Perspect.* 110: 674-681. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.110-a674>.
- [134] Townsend, A.C., Bruce, D., 2010. The use of night-time lights satellite imagery as a measure of Australia's regional electricity consumption and population distribution. *Int. J. Remote Sens.* 31:4459-4480. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160903261005>.
- [135] Venter, O., Sanderson, E.W., Magrath, A., Allan, J.R., Beher, J., Jones, K.R., Possingham, H.P., Laurence, W.F., Wood, P., Fekete, B.M., Levy, M.A., Watson, J.E., 2016. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nat. Commun.* 7. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms12558>.
- [136] Weidmann, N.B., Schutte, S., 2016. Using night light emissions for the prediction of local wealth. *J. Peace Res.* 0022343316630359. <http://dx.doi.org/10.1177/0022343316630359>.
- [137] Welch, R., 1980. Monitoring urban population and energy utilization patterns from satellite data. *Remote Sens. Environ.* 9:1-9. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90043-7](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(80)90043-7).
- [138] Witmer, F.D.W., O'Loughlin, J., 2011. Detecting the effects of wars in the Caucasus regions of Russia and Georgia using radiometrically normalized

- DMSP-OLS nighttime lights imagery. *GIScience Remote Sens.* 48:478-500. <http://dx.doi.org/10.2747/1548-1603.48.4.478>.
- [139] Xu, T., Ma, T., Zhou, C., Zhou, Y., 2014. Characterizing spatio-temporal dynamics of urbanization in China using time series of DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sens.* 6: 7708-7731. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6087708>.
- [140] Yi, Kunpeng, Tani, Hiroshi, Li, Qiang, Zhang, Jiquan, Guo, Meng, Bao, Yulong, Wang, Xiufeng, Li, Jing, 2014. Mapping and evaluating the urbanization process in northeast China using DMSP/OLS nighttime light data. *Sensors* 14 (2) , 3207-3226.
- [141] Zhang, Q., Seto, K., 2013. Can night-time light data identify typologies of urbanization? A global assessment of success and failures. *Remote Sens.* 5:3476-3494. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5073476>.
- [142] Zhang, Q., Seto, K.C., 2011. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sens. Environ.* 115: 2320-2329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.032>.
- [143] Zhao, M., Cheng, W., Liu, Q., Wang, N., 2016. Spatiotemporal measurement of urbanization levels based on multiscale units: A case study of the Bohai Rim Region in China. *J. Geogr. Sci.* 26 (5) , 531-548.
- [144] Zhou, Y., Smith, S.J., Elvidge, C.D., Zhao, K., Thomson, A., Imhoff, M., 2014. A cluster-based method to map urban area from DMSP/OLS nightlights. *Remote Sens. Environ.* 147, 173-185.
- [145] Zhou, Y., Ma, T., Zhou, C., Xu, T., 2015a. Nighttime light derived assessment of regional inequality of socioeconomic development in China. *Remote Sens.* 7:1242-1262. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70201242>.
- [146] Zhou, N., Hubacek, K., Roberts, M., 2015b. Analysis of spatial patterns of urban growth across South Asia using DMSP-OLS nighttime lights data. *Appl. Geogr.* 63:292-303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.016>.
- [147] Zhou, L., Divakarla, M., Liu, X., 2016. An overview of the Joint Polar Satellite System (JPSS) science data product calibration and validation. *Remote Sens.* 8:139. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8020139>.
- [148] Zhuo, L., Ichinose, T., Zheng, J., Chen, J., Shi, P.J., Li, X., 2009. Modelling the population density of China at the pixel level based on DMSP/OLS non-radiance-calibrated nighttime light images. *Int. J. Remote Sens.* 30:1003-1018. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160802430693>.

- [149] Ziskin, D., Baugh, K., Hsu, F.C., Elvidge, C.D., 2010. Methods used for the 2006 radiance lights. *Proc. Asia-Pacific Advanced Network* 30:131-142. <http://dx.doi.org/10.7125/APAN.30.18>.