

Ночная светимость земной поверхности как количественный показатель антропогенной нагрузки на экосистемы

А.А. Тронин, В.И. Горный, С.Г. Крицук, И.Ш. Латыпов

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург 197110, Россия

E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru

Ночная светимость земной поверхности может рассматриваться как интегральный и количественный показатель антропогенной нагрузки на экосистемы в рамках энергетического подхода к оценке уровня экологической безопасности территорий. Ночная светимость имеет высокую корреляцию с потреблением первичных энергетических ресурсов на региональном уровне. Радиация, фиксируемая в ночное время спутниковой системой Suomi NPP (сканер VIIRS), пересчитывается в потребление первичных энергетических ресурсов. Фотосинтетически активная радиация, поглощённой растениями определяется по данным о первичной продукции растений по данным дистанционных наблюдений спутников системы EOS. Энергетический подход к оценке уровня экологической безопасности территорий заключается в сравнении фотосинтетически активной радиации, поглощённой растениями и антропогенной энергетической нагрузки на регионы. Предложено вычислять уровень экологической безопасности как отношение величины фотосинтетически активной радиации, поглощённой растениями (эквивалент продуктивности экосистем) и антропогенной энергетической нагрузки на экосистемы. Получены оценки уровня антропогенной нагрузки на экосистемы для Северо-Запада России по данным о ночной светимости, позволяющие построить карты уровня экологической безопасности территорий с высоким разрешением. Уровень экологической безопасности оказался наиболее высок в Карелии и Архангельской области, где уровень антропогенной нагрузки относительно невелик, а экосистемы получают достаточное количество солнечной энергии для парирования угроз экологической безопасности. Самый низкий уровень безопасности – в Санкт-Петербурге, что объясняется огромной энергетической нагрузкой и малой площадью городской агломерации.

Ключевые слова: ночная светимость, продуктивность экосистем, антропогенная нагрузка, экологическая безопасность.

Введение

Проблема оценки уровня экологической безопасности территорий с использованием данных дистанционного зондирования является относительно новой (Горный и др., 2011). Одно из возможных направлений исследований – энергетический подход к оценке уровня экологической безопасности. Проведённые ранее исследования базировались на сравнении фотосинтетически активной радиации, поглощённой растениями и потреблении первичных энергетических ресурсов (антропогенной энергетической нагрузки) на экосистемы на уровне регионов Северо-Западного федерального округа (Тронин, 2013). Энергетический подход для оценки уровня безопасности экосистем с помощью дистанционных методов претендует на универсальность, так как проблемы энергии являются ключевыми в проблемах изучения экосистем (Одум, 1975).

В результате исследований была построена карта экологической безопасности Северо-Западного федерального округа на уровне регионов. Низкое пространственное разрешение карты было вызвано тем, что уровень потребления первичных энергетических ресурсов или антропогенная энергетическая нагрузка, были известны только на региональном уровне.

В дистанционных методах исследований давно используются данные о ночной светимости земной поверхности. Измерения с метеорологических спутников DMPS использовались для оценки потребления электроэнергии в отдельных странах и регионах по измерениям в ночное время потока радиации в видимом диапазоне, создаваемом осветительными приборами (Elvidge et al., 1997, Letu et al., 2010). Запущенный в 2011 г. спутник новой метеорологической системы Suomi NPP позволяет вести наблюдение за ночной светимостью на количественном уровне.

Таким образом, целью работы стало дальнейшее развитие энергетического подхода к проблемам экологической безопасности. Основной задачей исследования было повышение пространственного разрешения карт уровня экологической безопасности территорий, путём использования данных о ночной светимости территорий и температуры земной поверхности.

Данные

Продуктивность экосистем и радиация, поглощённая растениями

Для определения продуктивности экосистем радиации, поглощаемой растениями, используются данные дистанционного зондирования спутниковой системы EOS (Terra/Aqua), наземные метеорологические данные и модели экосистем. Базовым является продукт MOD17, содержащий данные о чистой первичной продукции (NPP) экосистем (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/pdf/MOD_17.pdf). Данные доступны для 8-дневных интервалов и на годовом уровне. Нами были использованы данные о среднегодовой продуктивности экосистем с 2000 по 2010 гг. Анализ среднегодовых значений показал соответствие получаемых дистанционных данных наземным наблюдениям (например, за урожайностью), но выявил определённые проблемы с качеством данных. Так, данные 2010 г. содержат большое количество брака и не могут быть использованы в анализе. На территории восточного побережья Балтийского моря наблюдается устойчивая положительная аномалия первичной продукции, имеющая прямолинейные границы и вызванная ошибкой алгоритма.

Для дальнейших расчётов нами была получена средняя чистая первичная продукция экосистем с 2000 по 2009 гг. (рис. 1). На изображении отчётливо прослеживается изменение продуктивности экосистем, соответствующее физико-географическим зонам: минимум – в области тундры на севере и в степи – на юго-востоке, максимум приходится на зону южной тайги. Сельскохозяйственные области имеют меньшую продуктивность, чем лесные.

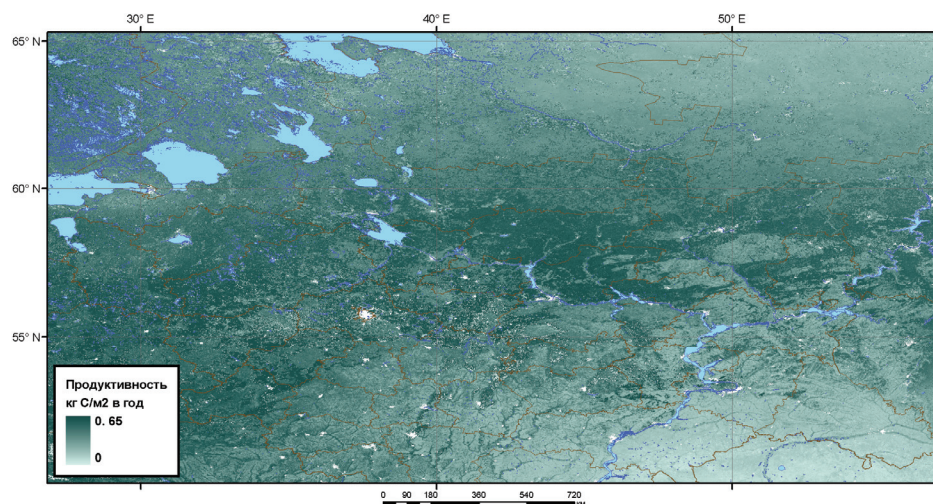


Рис. 1. Средняя чистая первичная продукция экосистем Европейской части России по данным MODIS за 2000-2009 гг.

Энергетическая нагрузка на регионы

Исходными данными для определения энергетической нагрузки стали данные о ночной светимости земной поверхности, полученные сканером VIIRS системы Suomi NPP. Для измерения потока в ночное время был использован канал DNB (Day/Night Band), снимающий поверхность в спектральном диапазоне 0,7 мкм с постоянным пространственным разрешением 742 м по линии сканирования и строке. Для исследований были использованы данные о среднегодовой светимости за период с апреля по октябрь 2012 г. (NOAA's National Geophysical Data Center). При построении средних значений были просуммированы только данные, полученные в новолуние, маска облачности генерировалась по тепловым каналам. Данные не фильтровались от источников света, связанных с пожарами, горящими газовыми факелами, извержениями вулканов и полярными сияниями. Единицы измерения светового потока – нВт/(см²*ср).

Данные о потреблении первичных энергетических ресурсов субъектами федерации были заимствованы из опубликованных топливно-энергетические балансов регионов (Тронин, 2013).

Метод

Продуктивность экосистем и радиация, поглощённая растениями

Методика определения продуктивности экосистем по данным дистанционного зондирования подробно изложена в документации к продукту MOD17 сканера MODIS (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/pdf/MOD_17.pdf) и предыдущем исследовании (Тронин, 2013). Основываясь на упрощённом соотношении: $APAR = NPP/\epsilon$, где, APAR – величина

на фотосинтетически активной радиации, поглощённой растениями, Вт/м^2 ; NPP – чистая первичная продукция, $\text{кгС}/(\text{м}^2 \times \text{с})$; ϵ – эффективность фотосинтезаданной экосистемы, $\text{кгС}/\text{Дж}$; можно восстановить величины APAR. Численные значения APAR для экосистем Северо-Западного федерального округа приведены ранее (Тронин, 2013). Таким образом, были подготовлены данные о средней фотосинтетически активной радиации, поглощённой растениями на территорию РФ за 2000-2009 гг. с разрешением на местности 1 км.

Антропогенная энергетическая нагрузка

Для выявления связи между ночной светимостью земной поверхности, полученной по данным VIIRS и потреблением первичных энергетических ресурсов, было построено распределение этих величин (рис. 2). Анализ показал высокие значения коэффициента корреляции (0,99) светимости и потребления энергии, что позволило пересчитать значения ночной светимости в потребление первичных энергетических ресурсов с высоким пространственным разрешением.

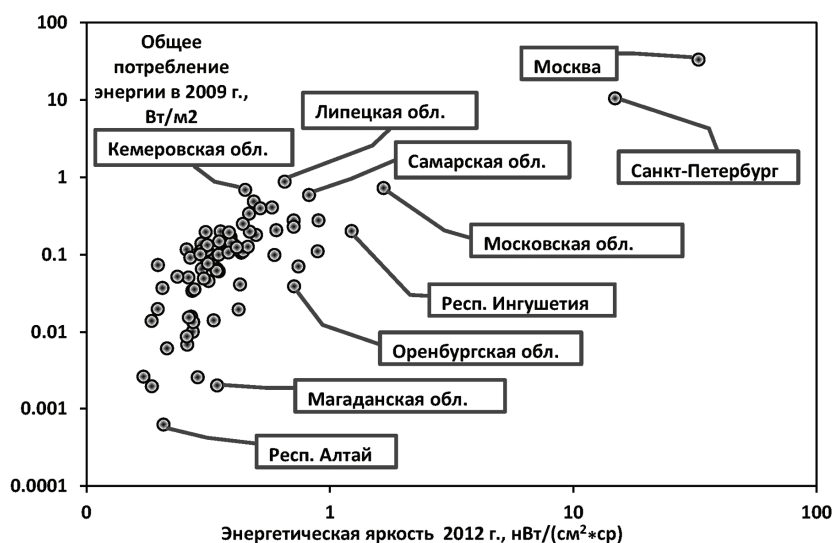


Рис. 2. Зависимость потребления первичных энергетических ресурсов от ночной светимости регионов РФ

Для сравнения продуктивности экосистем и энергетической нагрузки необходимо привести их к одинаковым единицам измерения. Энергетическая нагрузка на экосистемы вычислялись пересчётом потребления первичных энергетических ресурсов субъектами Российской Федерации за год из тысяч тонн условного топлива в мощность, измеряемую в Ваттах, а затем нормировалась на площадь субъекта федерации. Таким образом, была получена оценка потока или антропогенной энергетической нагрузки (AEL) на регионы. Фрагмент карты антропогенной энергетической нагрузки показан на рис. 3. Регионы значительно отличаются по энергетической нагрузке. Максимальных значений она достигает в городах: в Москве – более

33 Вт/м², в Санкт-Петербурге она составляет около 10 Вт/м². Области и республики имеют значительно меньшие нагрузки: в Липецкой области – 0,88, в Московской – 0,73, Кемеровской – 0,69, Самарской – 0,59 Вт/м². Республика Калмыкия и Чукотский автономный округ характеризуются минимальной энергетической нагрузкой – не более 2 мВт/м².

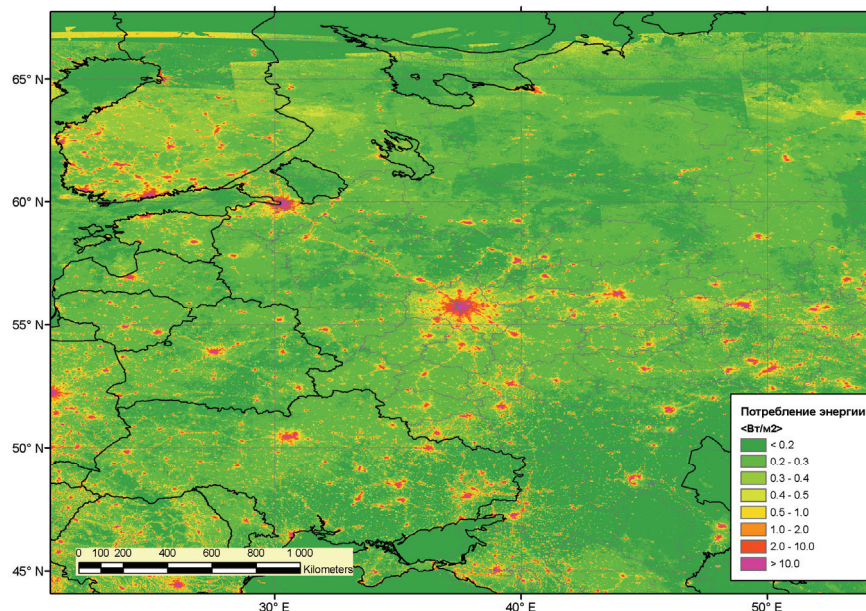


Рис. 3. Антропогенная энергетическая нагрузка регионов Европейской части России в 2009 г., Вт/м²

Сравнение продуктивности экосистем и энергетической нагрузки

Получив величины фотосинтетически активной радиации, поглощённой растениями (эквивалент продуктивности экосистем) и антропогенную энергетическую нагрузку в одних и тех же единицах – Вт/м², можно провести их сравнение. В данном случае для каждого региона было вычислено отношение: $ESL = APAR / AEL$, где ESL – уровень экологической безопасности. Результаты вычислений показаны на рис. 4.

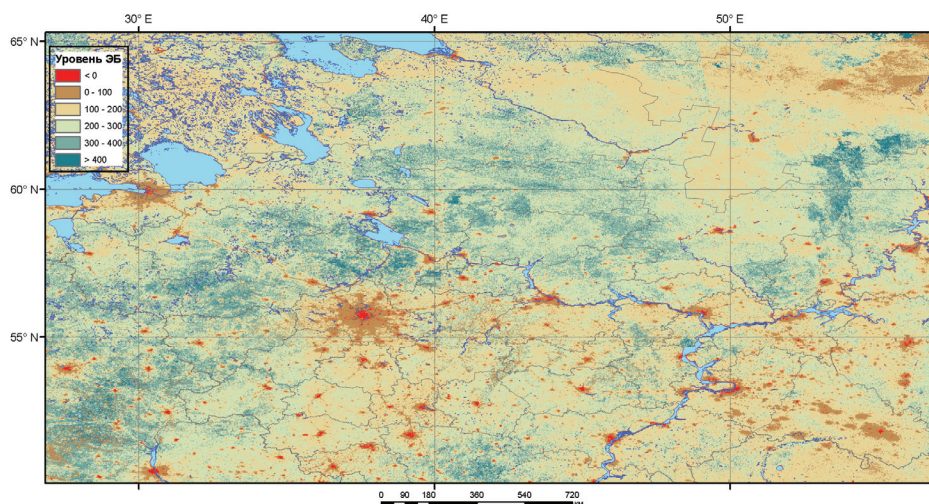


Рис. 4. Уровень экологической безопасности регионов Европейской части России в 2009 г.

Результаты

В результате исследований был построен индекс – безразмерная величина – отношение фотосинтетически активной радиации, поглощённой растениями к антропогенной энергетической нагрузке на регионы, который предложено рассматривать как уровень экологической безопасности региона. Рассмотрим более подробно результаты, полученные для Северо-Западного федерального округа (табл.).

Таблица. Уровень экологической безопасности регионов Северо-Западного федерального округа в 2009 г.

<i>Субъект Федерации</i>	<i>Антропогенная энергетическая нагрузка (AEL), Вт/м²</i>	<i>Фотосинтетически активная радиация, поглощённая растениями (APAR), Вт/м²</i>	<i>Уровень экологической безопасности (ESL)</i>
Республика Карелия	0,02	46	2910
Республика Коми	0,03	38	1120
Архангельская область	0,02	45	2248
Ненецкий автономный округ	0,02	24	1174
Вологодская область	0,12	53	449
Калининградская область	0,18	72	399
Ленинградская область	0,21	50	242
Мурманская область	0,05	32	609
Новгородская область	0,09	55	591
Псковская область	0,04	58	1612
г. Санкт-Петербург	10,51	45	4

Полученные величины говорят о том, что уровень экологической безопасности наиболее высок в Карелии и Архангельской области, где уровень антропогенной нагрузки относительно невелик, а экосистемы получают достаточное количество солнечной энергии для парирования угроз экологической безопасности. Самый низкий уровень безопасности – в Санкт-Петербурге, что объясняется огромной энергетической нагрузкой на малую площадь городской агломерации. Наибольший интерес представляет собой сравнение регионов, имеющих схожие географические условия или одинаковую энергетическую нагрузку, например, Псковская и Новгородская, Псковская и Мурманская области. Так, имея схожие характеристики по APAR, Псковская и Новгородская области практически в три раза различаются по уровню экологической безопасности. С другой стороны, Псковская область имеет энергетическую нагрузку на 30% ниже, чем Мурманская, в то время как уровень экологической безопасности последней в 2,5 раза ниже, чем в Псковской области.

Обсуждение

Полученные оценки уровня экологической безопасности сделаны на уровне регионов, что определяется статистическими данными по потреблению энергоресурсов. Более подробную картину потребления энергии можно получить, исследуя ночную светимость территории, которая напрямую связана с потреблением электроэнергии, а значит, и с потреблением всех энергоресурсов.

Корректность сравнения уровня антропогенной энергетической нагрузки с фотосинтетически активной радиации, поглощённой растениями также является предметом обсуждения. Лишь малая часть поглощённой растениями радиации (от 0,1 до 7%) идёт на синтез углеводов, остальное расходуется на нагрев, тепловое излучение, испарение и турбулентный теплообмен листовой поверхности.

Выбор энергетического подхода к оценке уровня экологической безопасности неслучаен. Устойчивость экосистем в значительной мере определяется способностью усваивать энергию, поступающую извне. Антропогенное же воздействие на экосистемы многообразно: химическое, физическое, механическое. Попыткой определить интегральную характеристику антропогенной нагрузки и сравнить её с энерговооружённостью экосистем и является настоящее исследование. Кроме энергии, универсальным инструментом сравнения могут служить экономические показатели, иначе – деньги. Количество антропогенной энергии и продукция экосистем могут быть оценены в рублях.

Заключение

В результате исследований предложен энергетический подход к оценке уровня экологической безопасности территорий. Он основывается на сравнении фотосинтетически активной радиации, поглощённой растениями и антропогенной энергетической нагрузки на регионы. Полученные оценки позволяют разделить территории по уровню экологической безопасности. Предложенный метод позволяет объединить природные и антропогенные факторы при оценке экологической безопасности.

Дальнейшее развитие методов оценки экологической безопасности регионов может быть направлено на изучение антропогенной нагрузки по ночной светимости. Также было бы целесообразно рассмотреть возможность разработки на базе Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов и Института космических исследований РАН отечественной радиационно-термодинамической модели бореальных экосистем, и как следствие, собственных оценок биологической продуктивности природных (лесов) и антропогенных (с/х земли) экосистем по данным дистанционного зондирования.

Литература

1. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. Термодинамический подход для дистанционного картографирования уровня антропогенной нагрузки на экосистемы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194.
2. Одум Ю. Основы экологии: М.: Мир, 1975. 744 с.
3. Тронин А.А. Энергетический подход к оценке уровня экологической безопасности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 9–17.
4. Elvidge C.D., Baugh K.E., Kihn E.A., Kroehl H.W., Davis E.R., Davis C.W. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption // International Journal of Remote Sensing. 1997. Vol. 18. No. 6. P. 1373–1379.
5. Letu Husi, Hara Masanao, Yagi Hiroshi, Naoki Kazuhiro, Tana Gegen, Nishio Fumihiko, Shuhei Okada. Estimating energy consumption from night-time DMPS/OLS imagery after correcting for saturation effects // International Journal of Remote Sensing. 2010. Vol. 31, No. 16. P. 4443–4458.

Nighttime lights as a quantitative indicator of anthropogenic load on ecosystems

A.A. Tronin, V.I. Gornyy, S.G. Kritsuk, I.Sh. Latypov

*Saint-Petersburg Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS
Saint-Petersburg 197110, Russia
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.edu*

Nighttime lights of the Earth's surface are considered as integral and quantitative indicator of anthropogenic load on ecosystems in the framework of energetic approach for ecological safety level rating. Nighttime lights have high correlation with primary energy consumption at the regional level. Nighttime radiation recorded on satellite Suomi NPP (radiometer VIIRS) was recalculated to primary energy consumption. Photosynthetically active radiation absorbed by plants is determined from ecosystem primary production. EOS satellite system product MOD17 supplies global primary production information. Energetic approach is based on comparison of photosynthetically active radiation, absorbed by plants and anthropogenic energy load on ecosystems. Ecological safety level was calculated as the relation of photosynthetically active radiation to anthropogenic load on ecosystems. Ecological safety map for northwest part of European Russia was compiled with high spatial resolution on the basis of nighttime lights and ecosystem primary production satellite data. The highest level of ecological safety was defined for Karelia and Arkhangelsk region where anthropogenic load on ecosystems is relatively moderate and plants receive enough solar radiation to parry threats to ecosystem service. The very low ecological safety level was observed in St-Petersburg that is explained by high energy load and small area of urban agglomeration.

Keywords: nighttime lights, ecosystem primary production, anthropogenic load, ecological safety.

References

1. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Termodinamicheskii podkhod dlya distantsionnogo kartografirovaniya urovnya antropogennoi nagruzki na ekosistemy (Remote mapping of thermodynamic index of ecosystem health disturbance), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 179–194.
2. Odum E.P., *Fundamentals of Ecology*, Moscow: Mir, 1975, 744 p.
3. Tronin A.A., Energeticheskii podkhod k otsenke urovnya ekologicheskoi bezopasnosti (Remote sensing in ecological safety), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 9–17.
4. Elvidge C.D., Baugh K.E., Kihn E.A., Kroehl H.W., Davis E.R., Davis C.W., Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption, *International Journal of Remote Sensing*, 1997, Vol. 18, No. 6, pp. 1373–1379.
5. Letu Husi, Hara Masanao, Yagi Hiroshi, Naoki Kazuhiro, Tana Gegen, Nishio Fumihiko, Shuhei Okada, Estimating energy consumption from night-time DMPS/OLS imagery after correcting for saturation effects, *International Journal of Remote Sensing*, 2010, Vol. 31, No. 16, pp. 4443–4458.