

Энергетический подход к оценке уровня экологической безопасности

А.А. Тронин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, 197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru

Предложен энергетический подход к оценке уровня экологической безопасности территорий. Он основывается на сравнении фотосинтетически активной радиации, поглощенной растениями и антропогенной энергетической нагрузки на регионы. Радиация, поглощенная растениями, восстанавливается по данным дистанционного зондирования спутников системы EOS. Антропогенная нагрузка на регионы определяется по потреблению первичных энергетических ресурсов. Получены оценки для Северо-Западного федерального округа, позволяющие разделить территории по уровню экологической безопасности. Предложенный метод позволяет объединить природные и антропогенные факторы при оценке экологической безопасности. Намечены направления развития дистанционных методов для оценки уровня экологической безопасности территорий.

Ключевые слова: дистанционные методы, продуктивность экосистем, антропогенная нагрузка, экологическая безопасность.

Введение

Проблема оценки уровня безопасности экосистем является базовой для экологической безопасности. Попытки определить уровень экологической безопасности территорий проводились и ранее. Предлагалось использовать в качестве оценки уровня безопасности долю пахотных земель или долю лесов в общей площади региона. Но эти оценки сильно зависят от типа экосистемы и фиксируют накопленную во времени нагрузку на территории (Касимов, 2002).

Энергетический подход при оценке состояния экосистем давно является ключевым в экологии (Одум, 1975; Jorgensen, Svirezhev, 2004). Экосистемы, в первую очередь растительность, играют важную роль в радиационном балансе Земли (Горный и др., 2011).

Антропогенное энергетическое воздействие на экосистемы также становится объектом исследований. Для описания процессов антропогенной трансформации экосистем использовались данные о потреблении энергии на единицу площади территории. Отмечалось, что распределение по территории страны энергопотребления на площадь и уровня трансформированности экосистем дают сходную картину (Мартынов А.С., Артюхов В.В., Виноградов В.Г. Web-Атлас: «Окружающая среда и здоровье населения России», 1998; <http://www.sci.aha.ru/ATL/ra00.htm>). Здесь же и в работах Эколого-энергетического рейтингового агентства Интерфакс-ЭРА (<http://interfax-era.ru/metodologiya>) поднимается вопрос об энергетической эффективности регионов и КПД использования энергетических ресурсов (Мастепанов и др., 2001).

Целью работы является определение возможностей сопоставления на количественном уровне антропогенной энергетической нагрузки на территории и энергии, усвоенной растениями. На основании такого сопоставления предполагается сделать выводы об уровне

экологической безопасности территорий. Энергия, поглощенная растениями, определяется через продуктивность экосистем. Следующей задачей является определение возможностей дистанционных методов дистанционного зондирования для определения энергетического баланса территорий.

Данные

Продуктивность экосистем

Для определения продуктивности экосистем используются данные дистанционного зондирования спутниковой системы EOS (Terra/Aqua), наземные метеорологические данные и модели экосистем. В качестве исходных спутниковых данных привлекается информация о типе экосистемы (продукт Land Cover MOD 12), индексе листовой поверхности (LAI), фракции фотосинтетически активной радиации, поглощенной растением (FPAR) – продукт MOD 15. В качестве метеорологических данных используются среднесуточные значения результатов реанализа системы MERRA (<http://gmao.gsfc.nasa.gov/merra/>), позволяющей на основе информации сети метеорологических станций построить непрерывные поля метеорологических параметров для каждого пикселя спутникового снимка. Третьим компонентом является радиационно-термодинамическая модель экосистем Biome Properties Lookup Table (BPLUT), основной задачей которой является восстановление значений эффективности фотосинтеза в определенных метеорологических условиях и типе экосистемы.

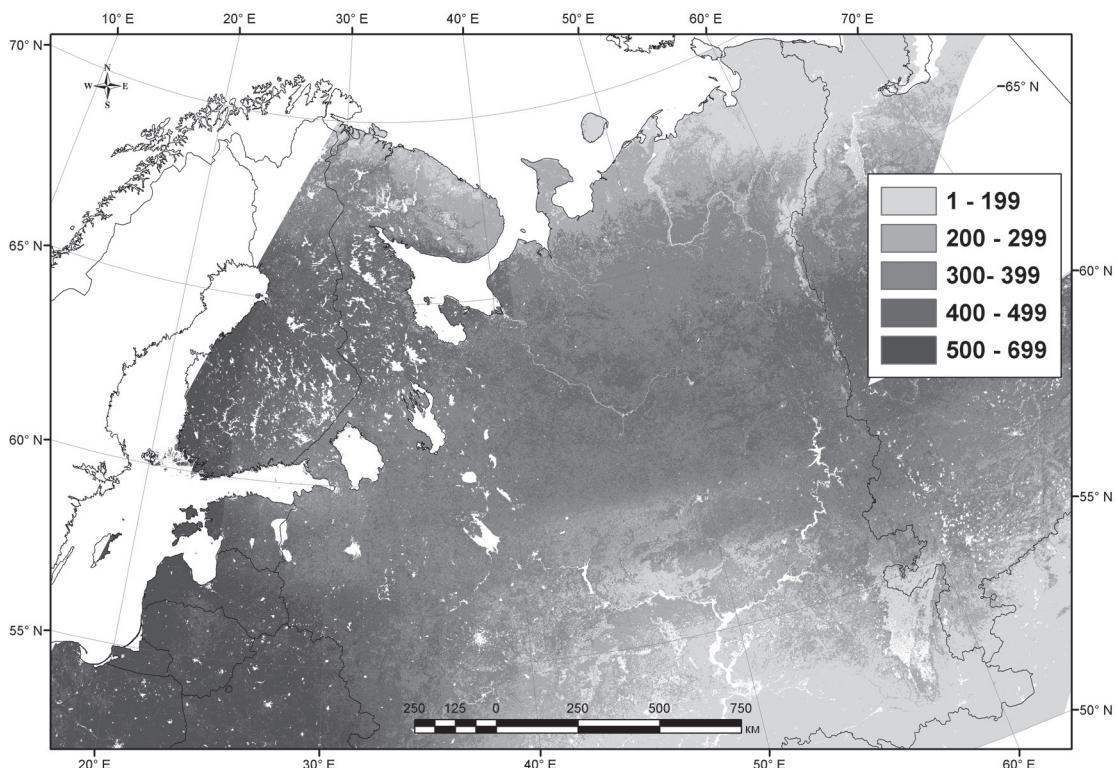


Рис. 1. Чистая первичная продукция экосистем севера Европейской части России по данным MODIS за 2010 г., $\text{g}_\text{C}/(\text{m}^2 \times \text{год})$

В результате получается продукт MOD 17, содержащий данные о чистой первичной продукции (NPP) экосистем (<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproducts/mod17.pdf>). Данные доступны для 8-дневных интервалов и на годовом уровне (*рис. 1*). Предварительный анализ показывает достаточно высокое качество продукта на годовом уровне: отсутствие «стыков» при переходе от одной экосистемы к другой, адекватные значения продукции экосистем.

Энергетическая нагрузка на регионы

Определение энергетической нагрузки на регионы стало возможно в результате принятия Федерального закона № 261 от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности». В результате выполнения мероприятий по этому закону были определены и опубликованы топливно-энергетические балансы субъектов Федерации. В этих балансах выделяется потребление первичных энергетических ресурсов или потребление первичной энергии – совокупность различных видов топлива и энергии (продукция нефтедобывающей, газовой, угольной, торфяной и сланцевой промышленности, электроэнергия атомных и гидроэлектростанций, а также местные виды топлива), которые потребляются на территории региона. Обычно количество энергии выражается в тоннах условного топлива. Данные о потреблении первичных энергетических ресурсов по субъектам федерации приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Среднегодовое потребление первичных энергетических ресурсов субъектами Российской Федерации в 2009 г., тыс. т условного топлива

<i>Субъект Федерации</i>		<i>Субъект Федерации</i>		<i>Субъект Федерации</i>	
Республика Карелия	3096	Республика Башкортостан	24878	Ханты-Мансийская автономная область – Югра	40700
Республика Коми	15406	Республика Марий Эл	1652	Ямало-Ненецкий автономный округ	11836
Архангельская область	8883	Республика Мордовия	3221	Тюменская область	8545
Ненецкий автономный округ	3825	Республика Татарстан	20320	Свердловская область	41165
Вологодская область	18330	Удмуртская Республика	6444	Челябинская область	38002
Калининградская область	2938	Чувашская Республика	3936		
Ленинградская область	18778	Пермский край	34705	Краснодарский край	22700
Мурманская область	8314	Кировская область	6597	Республика Адыгея	934
Новгородская область	5462	Нижегородская обл.	20746	Ростовская область	11665
Псковская область	2142	Оренбургская область	5227	Волгоградская область	16227
Санкт-Петербург	15842	Пензенская область	2861	Астраханская область	5857
		Самарская область	34220	Республика Калмыкия	157
Белгородская область	11930	Саратовская область	10920		
Брянская область	3839	Ульяновская область	5980	Ставропольский край	13901

<i>Субъект Федерации</i>		<i>Субъект Федерации</i>		<i>Субъект Федерации</i>	
Владimirская область	10664			Карачаево-Черкесская Республика	1189
Воронежская область	7528	Алтайский край	9444	Республика Дагестан	6892
Ивановская область	2643	Томская область	14013	Республика Северная Осетия – Алания	1985
Калужская область	3199	Омская область	17018	Кабардино-Балкарская Республика	1680
Костромская область	5981	Красноярский край	56138	Чеченская Республика	–
Курская область	6278	Иркутская область	16490	Республика Ингушетия	788
Липецкая область	22761	Республика Тыва	1257		
Московская область	35910	Забайкальский край	6273	Чукотский автономный округ	484
Орловская область	1902	Республика Алтай	621	Магаданская область	996
Рязанская область	7181	Новосибирская область	11959	Республика Саха (Якутия)	8620
Смоленская область	2467	Республика Бурятия	3829	Камчатский край	1271
Тамбовская область	4296	Республика Хакасия	4358	Хабаровский край	7500
Тверская область	12726	Кемеровская область	71363	Амурская область	6050
Тульская область	13494			Сахалинская область	9533
Ярославская область	4160	Курганская область	2876	Приморский край	13143
Москва	39370			Еврейская автономная область	547

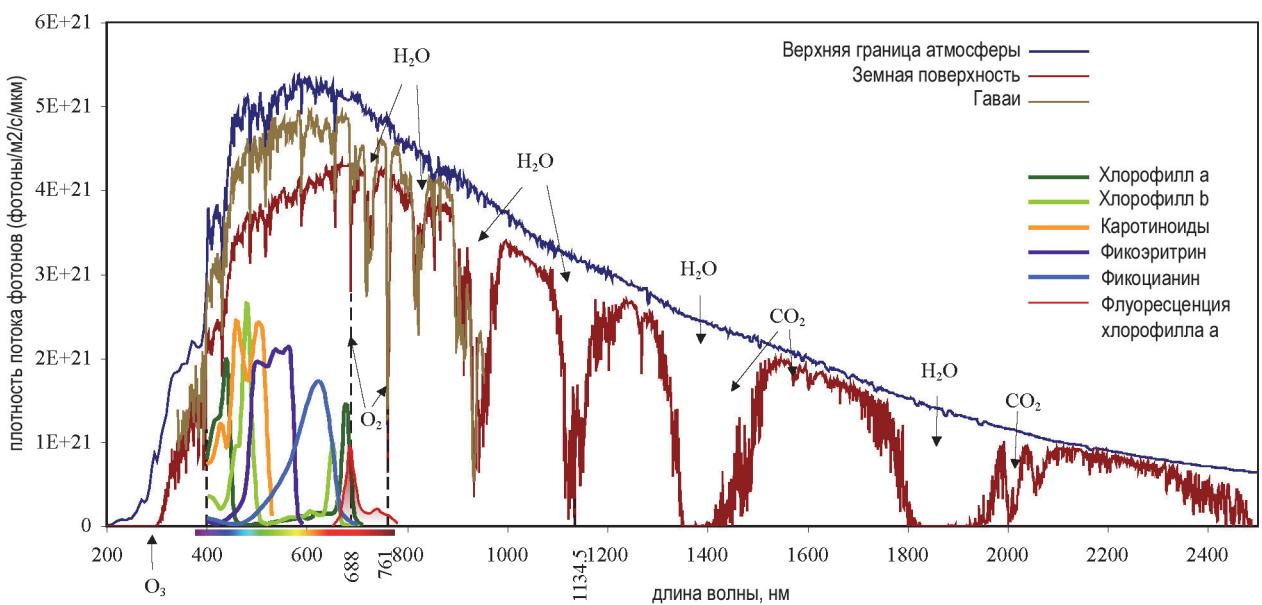
Метод

Продуктивность экосистем

Рассмотрим более подробно методику расчета первичной продукции растений по данным дистанционных наблюдений. Приходящая коротковолновая солнечная радиация (SWRAD) не полностью усваивается растениями (*рис. 2*), только приблизительно половину коротковолновой радиации можно отнести к фотосинтетически активной радиации, падающей на растения (IPAR): $IPAR = [0.45 \div 0.5] \times SWRAD (\text{Вт}/\text{м}^2)$. Затем по спутниковым данным определяется доля фотосинтетически активной радиации, поглощенной растениями (FPAR) – фактически это коэффициент поглощения растениями в диапазоне 400–700 нм. В результате получается величина фотосинтетически активной радиации, поглощенной растениями (APAR): $APAR = IPAR (\text{Вт}/\text{м}^2) \times FPAR$. Следующий этап – наиболее важный – переход от радиации к продукции растений в граммах углерода:

$$GPP = \epsilon (\text{г}_C/\text{Дж}) \times APAR (\text{Вт}/\text{м}^2), \quad (1)$$

где GPP – валовая первичная продукция, $\text{г}_C/(\text{м}^2 \times \text{с})$; ϵ – эффективность фотосинтеза, $\text{г}_C/\text{Дж}$; $\epsilon = \epsilon_{\max} \times f(T) \times g(W)$; ϵ_{\max} – максимальная эффективность фотосинтеза данной экосистемы; $f(T)$ и $g(W)$ – функции зависимости ϵ от температуры и дефицита влажности воздуха. На последнем этапе происходит вычисление чистой первичной продукции:



*Рис. 2. Спектры солнечной радиации на верхней границе атмосферы, на земной поверхности (в целом), на уровне моря на Гавайских островах. Показана фотосинтетически активная радиация в диапазоне 400–700 нм и спектры поглощения основных фотосинтетических пигментов растений и водорослей *in vivo* (no Kiang и др., 2007)*

$$NPP = GPP - R_a, \quad (2)$$

где NPP – чистая первичная продукция, $\text{г C}/(\text{м}^2 \times \text{с})$; R_a – дыхание растений.

Величина ϵ_{\max} табулирована для каждой из экосистем. Функции $f(T)$ и $g(W)$ также определены для каждой из экосистем в радиационно-термодинамической модели экосистем BPLUT. R_a определяется по результатам спутниковых измерений индекса листовой поверхности и наземных метеорологических данных.

Для сравнения с антропогенной энергетической нагрузкой целесообразно использовать энергетические характеристики, поэтому полученные данные о продуктивности экосистем были пересчитаны в величины фотосинтетически активной радиации, поглощенной растениями (APAR) по формулам (1) и (2). Численные значения APAR приведены в табл. 2.

Таблица 2. Средняя фотосинтетически активная радиация, поглощенная растениями (APAR), Северо-Западный федеральный округ, 2000–2010 гг.

Субъект Федерации	APAR, Вт/м ²	Субъект Федерации	APAR, Вт/м ²
Республика Карелия	46	Ленинградская область	50
Республика Коми	38	Мурманская область	32
Архангельская область	45	Новгородская область	55
Ненецкий автономный округ	24	Псковская область	58
Вологодская область	53	Санкт-Петербург	45
Калининградская область	72		

Антропогенная энергетическая нагрузка

Для сравнения продуктивности экосистем и энергетической нагрузки необходимо привести их к одинаковым единицам измерения. Энергетическая нагрузка на экосистемы вычислялась пересчетом 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. 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: в Санкт-Петербурге она составляет около 10 Вт/м², в Москве – более 33 Вт/м², в Вологодской, Калининградской и Ленинградской областях – от 100 до 200 мВт/м², а в остальных регионах – десятки мВт/м².

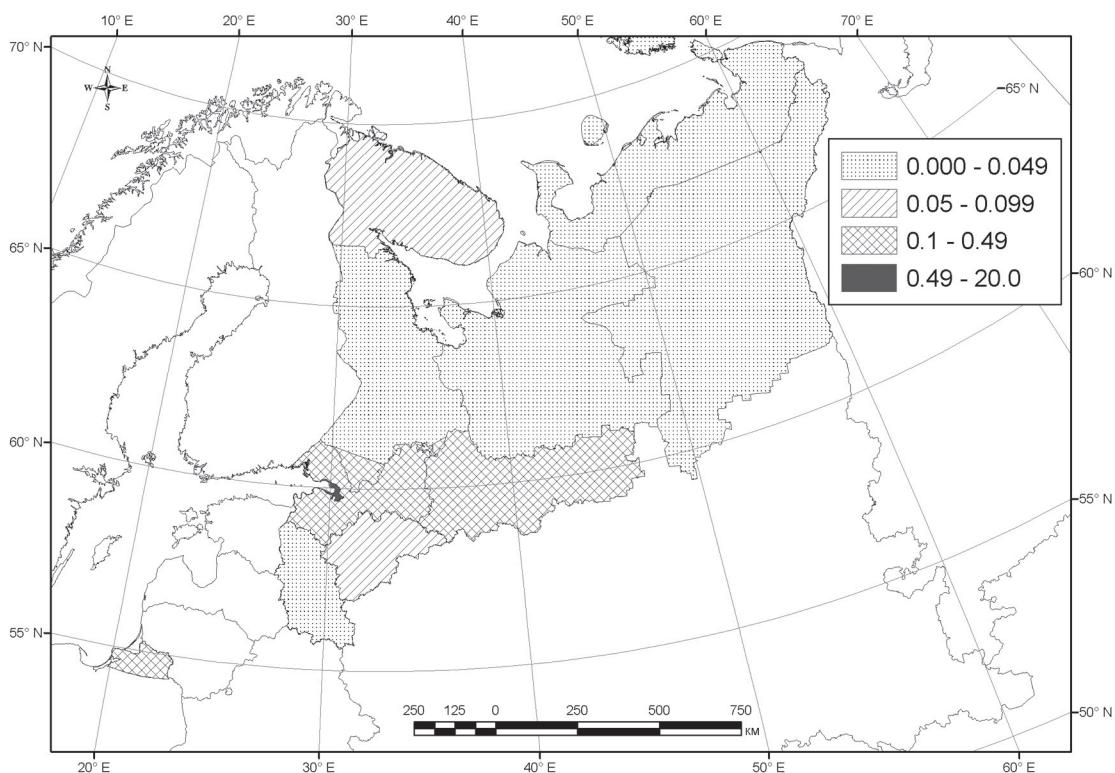


Рис. 3. Антропогенная энергетическая нагрузка регионов Северо-Западного федерального округа в 2009 г., Вт/м²

Сравнение продуктивности экосистем и энергетической нагрузки

Получив величины фотосинтетически активной радиации, поглощенной 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*.

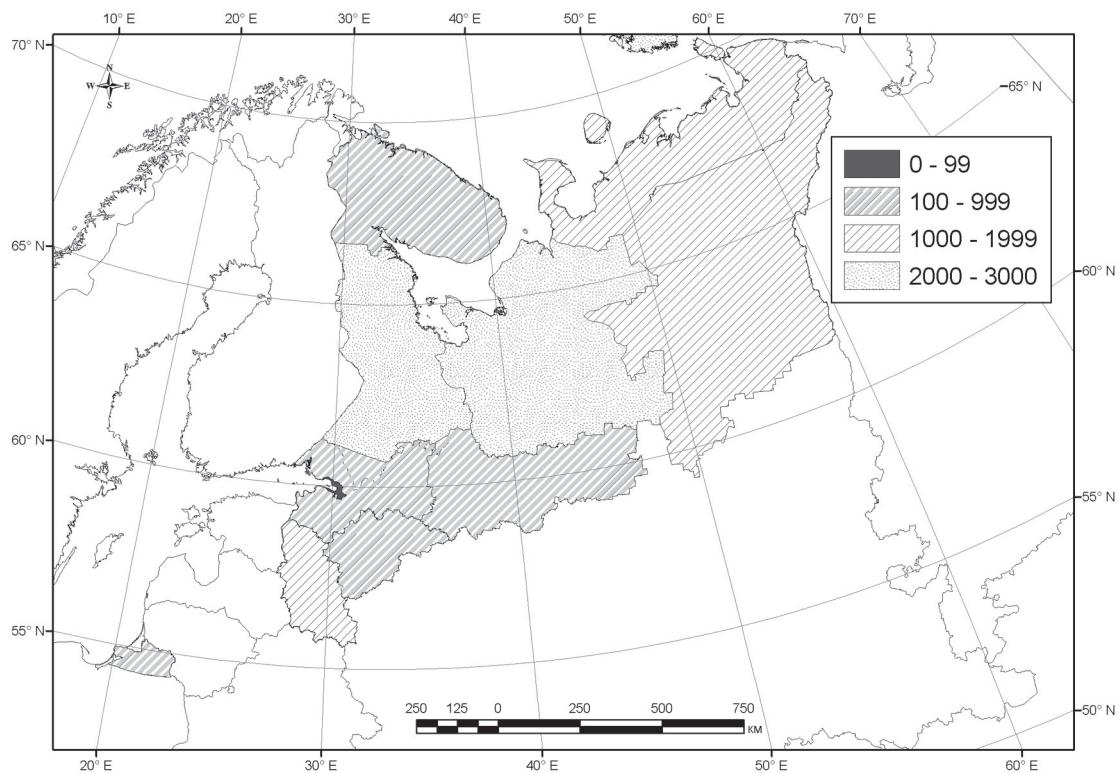


Рис. 4. Уровень экологической безопасности регионов Северо-Западного федерального округа в 2009 г.

Результаты

В результате исследований был построен индекс – безразмерная величина – отношение фотосинтетически активной радиации, поглощенной растениями, к антропогенной энергетической нагрузке на регионы, который предложено рассматривать как уровень экологической безопасности региона. Рассмотрим более подробно полученные результаты для Северо-Западного федерального округа (табл. 3).

Таблица 3. Уровень экологической безопасности регионов Северо-Западного федерального округа в 2009 г.

<i>Субъект Федерации</i>	<i>ESL</i>	<i>Субъект Федерации</i>	<i>ESL</i>
Республика Карелия	2910	Ленинградская область	242
Республика Коми	1120	Мурманская область	609
Архангельская область	2248	Новгородская область	591
Ненецкий автономный округ	1174	Псковская область	1612
Вологодская область	449	Санкт-Петербург	4
Калининградская область	399		

Полученные величины говорят о том, что уровень экологической безопасности наиболее высок в Карелии и Архангельской области, где уровень антропогенной нагрузки

относительно невысок, 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 малой площади городской агломерации. Наибольший интерес представляет собой сравнение регионов, имеющих схожие географические условия или одинаковую энергетическую нагрузку, например Псковской и Новгородской, Псковской и Мурманской областей. Так, имея схожие характеристики по АPAR, Псковская и Новгородская области практически в три раза отличаются 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 радиацией, поглощенной растениями, также является предметом обсуждения. Лишь малая часть поглощенной растениями радиации (от 0,1 до 7%) идет на синтез углеводов, остальное расходуется на нагрев, тепловое излучение, испарение и турбулентный теплообмен листовой поверхности.

Выбор энергетического подхода к оценке уровня экологической безопасности не случаен. 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 ее с энергоооруженностью экосистем 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, поглощенной 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. Касимов Н.С. Экологический Атлас России. М.: ЗАО «Карта», 2002. 128 с.
3. Мастепанов А.М., Саенко В.В., Рыльский В.А., Шафранник Ю.К. Экономика и энергетика регионов Российской Федерации. М.: Экономика, 2001. 476 с.
4. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 744 с.
5. Jorgensen S.E., Svirezhev Yu.M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Oxford: Elsevier, 2004. 366 p.
6. Kiang N.Y., Siefert J., Govindjee, Blankenship R.E., Meadows V.S. Spectral signatures of photosynthesis I: Review of Earth organisms // Astrobiology. 2007. No. 7. P. 222–251.

Remote sensing in ecological safety

A.A. Tronin

Saint-Petersburg Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS
197110, Saint-Petersburg, 18 Korpusnaya Str.
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.edu

New energetic approach for ecological safety level rating is proposed. It is based on comparison of photosynthetically active radiation, absorbed by plants and anthropogenic energy load on regions. Solar radiation, absorbed by plants is retrieved with satellite remote sensing data from EOS system. Anthropogenic load of regions is determined by primary energy consumption. Ecological safety level rating was calculated for North-West part of Russia. Proposed method allows to join natural and anthropogenic components for ecological safety rating. Future development of remote sensing in ecosystem safety level definition is indicated.

Keywords: remote sensing, ecosystem primary production, anthropogenic load, ecological safety.