

## **МНОГОМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ЮЖНО-ТАЕЖНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

© 2012 Р.Б. Сандлерский

Институт проблем экологии и эволюции им А.Н. Северцова РАН

Поступила 15.03.2012

Работа посвящена выделению ведущих процессов преобразования солнечной энергии биогеоценотическим покровом южной тайги. Для территории Центрально-лесного биосферного заповедника (Тверская область) на основе многозональной космической съемки (20 сцен) рассчитаны термодинамические переменные, характеризующие основные составляющие энергетического баланса биогеоценозов. С помощью метода главных компонент из 100 термодинамических переменных (5 переменных для каждого срока, отражающих затраты поглощенной энергии на эвапотранспирацию, тепловой поток и производство биологической продукции) были получены параметры порядка – независимые термодинамические процессы, определяющие преобразование солнечной энергии биогеоценотическим покровом.

**Ключевые слова:** солнечная энергия, эксергия, информация Кульбака, параметры порядка.

Интенсивное развитие данных дистанционного зондирования в последние десятилетия создало предпосылки для использования многозональной космической съемки в качестве измерительной системы составляющих энергетического баланса экосистем. На основе современных представлений термодинамики были определены соотношения приходящей и отраженной солнечной энергии в различных спектральных каналах, отражающие работу экосистемы по преобразованию поглощенной солнечной энергии. Согласно теоретическим представлениям [7], баланс поглощенной экосистемой солнечной энергии состоит из *эксергии* (максимальная полезная работа, которую можно получить при приведении рабочего тела или источника энергии в равновесие со средой), *связанной энергии* (энергия не способная совершить полезной работы, диссипация) и *приращения внутренней энергии* (аккумуляция энергии в системе). Полезной работой в экосистеме является осуществление круговорота влаги между почвой и атмосферой (эвапотранспирация). Эксергия солнечной радиации рассчитывается через *информацию Кульбака*, которая определяет степень неравновесности системы преобразующей энергию, или другими словами, приращение информации или порядка в неравновесной системе относительно равновесной (состояние максимума энтропии). Связанная энергия соответствует рассеянию солнечной энергии с *тепловым потоком* и *энтропией* от деятельной поверхности в атмосферу, приращение внутренней энергии в экосистеме – энергия идущая на взаимодействие компонентов системы между собой (энергия химических связей, накопление углерода). Затраты энергии на производство биологической продукции напрямую не входят в баланс и количественно оцениваются по *вегетационному индексу*, рассчитываемому по разности отраженной энергии в красном и ближнем инфракрасном диапазонах

длин волн. Для этого индекса и его производных во многих работах показана достоверная слабонелинейная связь с чистой первичной продукцией (NPP) [8, 3]. Таким образом, используя в качестве измерительной системы спектральнозональную съемку на основе термодинамического подхода можно оценить основные параметры преобразования солнечной энергии биогеоценотическим покровом.

По мере накопления данных дистанционного зондирования появляется возможность исследовать пространственно-временную динамику преобразования энергии биогеоценозами, в частности, оценить инвариантность преобразования энергии биогеоценотическим покровом и, соответственно, выделить термодинамические переменные с наибольшей и наименьшей изменчивостью [4]. Фактически, анализ позволил оценить, какие переменные являются целевыми (на их поддержание направлена работа биогеоценоза), а какие переменные выполняют функцию регулятора.

Целью настоящего сообщения является выделение ведущих процессов, определяющих пространственно-временное варьирование термодинамических переменных биогеоценотического покрова с помощью многомерного анализа. Традиционно целью многомерного анализа является снижение размерности пространства переменных с минимальной потерей информации [1]. Однако Герман Хакен [5] показал, что эта операция имеет смысл выделения параметров порядка, то есть ведущих процессов, определяющих рассматриваемое явление. Было показано, что эти параметры имеют физический смысл [2]. В данном случае исходное многомерное пространство определяется термодинамическими переменными за каждый срок наблюдения, отражающими в совокупности их пространственно-временную динамику. Соответственно в результате многомерного анализа выделяются практические независимые термодинамические процессы.

Исследование выполнено для территории Центрально-лесного биосферного заповедника (56° С.Ш., 32° В.Д.). Заповедник расположен в юго-западной части Валдайской возвышенности. Тер-

---

*Сандлерский Роберт Борисович*, м.н.с. лаб. биогеоценологии и исторической экологии им В.Н. Сукачева, e-mail: srobert\_landy@mail.ru

ритория представляет собой слабосхолмленную водораздельную равнину, на которой моренные гряды сочетаются с флювиогляциальными озерными котловинами. На моренных грядах преобладают леса с участием неморальных видов (липа, клен, вяз), в межгрядовых понижениях – сфагново-черничные ельники. Климат территории характеризуется избыточным увлажнением. Территория обеспечена комплексными полевыми описаниями (порядка 2000), цифровой моделью рельефа и ее производными (морфометрические характеристики на различных иерархических уровнях). Для расчета термодинамических характеристик использовано 20 безоблачных сцен Landsat TM и ETM+ за различные сезоны с 1986 по 2009 год. Съёмка Landsat выполняется в 7 спектральных диапазонах, в том числе 6 каналов в коротковолновой части спектра и 1 – длинноволновой (тепловой канал). Пространственное разрешение съёмки – 30 x 30 м. В многомерный анализ вошли основные термодинамические переменные для каждого срока: эксергия солнечной радиации,  $\text{вт/м}^2$ ; тепловой поток,  $\text{вт/м}^2$ ; эн-

тропия отраженной солнечной радиации, нит; информация Кульбака, нит; вегетационный индекс  $\text{вт/м}^2$ . Остальные термодинамические переменные являются в той или иной степени дополняющими – рассчитываются как разность или произведение переменных вошедших в анализ. Выделение параметров порядка осуществлялось с помощью метода главных компонент (факторный анализ). Для интерпретации полученных параметров порядка была использована карта типов биогеоценозов, полученная на основе интерполяции полевых данных по данным дистанционного зондирования и цифровая модель рельефа.

Размерность факторного пространства, определенная с помощью метода осыпи [1] для 100 термодинамических переменных составила 4. Четыре параметра описывают 70 %. Первый параметр описывает 36.7 % варьирования переменных, второй параметр описывает 20 %, третий – 7.5 %, четвертый – 5.7 %. В таблице 1 приведены обобщенные нагрузки для параметров порядка.

Таблица 1. Обобщенные нагрузки для термодинамических переменных

Переменная			Эксергия, $\text{вт/м}^2$	Тепловой поток, $\text{вт/м}^2$	Энтропия отраженной радиации, нит	Информация Кульбака, нит	Вегетационный индекс, нит
Срок съёмки	месяц	день					
		год	Номер и знак параметра				
Февраль	4	1987	1 –	1 –	1 –	4 –	1 –
	11	2007	1 –	1 –	4 +	4 –	1 –
Март	21	1986	1 –	1 –	1 –	1 +	1 –
	22	2001	1 –	1 –	4 +	4 –	3 +
	28	2003	1 –	1 –	1 –	1 +	1 –
Апрель	10	2002	2 +	1 +	1 +	3 +	3 +
	21	2009	2 +	1 +	3 –	3 +	3 +
	27	2000	1 –	1 +	3 –	4 +	4 +
Май	3	1990	1 –	1 +	2 –	4 +	1 +
Июнь	1	1992	1 –	1 +	4 –	4 +	4 +
	2	1995	1 –	1 +	4 –	4 +	2 –
	3	2007	1 –	1 +	2 +	2 –	2 –
	6	1988	1 –	1 +	4 –	4 +	4 +
	20	2002	1 –	1 +	2 +	2 –	2 –
	21		1 –	1 +	2 +	2 –	2 –
Август	22	2007	1 –	1 +	2 +	2 –	2 –
Сентябрь	20	2006	1 –	1 +	3 –	2 –	1 +
	25	2008	1 –	1 +	3 –	3 +	1 +
	27	2000	1 –	1 +	3 –	1 +	1 +
Октябрь	15	1986	1 –	3 –	1 +	3 +	1 +

Первый параметр (36.7 % варьирования переменных) связан главным образом с эксергией и тепловым потоком, причем вне вегетационного периода связь отрицательна, а в вегетационный период – положительна с тепловым потоком и отрицательна с эксергией. Параметр так же определяет вегетационный индекс зимой (отрицательная связь) и осенью – положительная связь. Пространственное варьирование параметра: максимум параметра наблюдается на открытых, безлесных участках – болотах и лугах, минимальные значения параметр

принимает для лесов с максимальным участием ели, промежуточные значения параметр принимает на зарастающих вырубках и лесах с преобладанием лиственных. Таким образом, первый параметр порядка можно интерпретировать как открытость территории. Действительно, вне вегетационного периода, при наличии снежного покрова тепловой поток и эксергия минимальны на участках без древесной растительности, а в вегетационный период, чем меньше древесной растительности, тем выше тепловой поток и меньше эксергия. Следует отме-

титель высокую положительную связь вегетационного индекса с параметром порядка весной и осенью, которая, по-видимому, отражает весенне-осеннюю вегетацию на верховых болотах.

Второй параметр порядка (20 % варьирования переменных) положительно определяет энтропию отраженной солнечной радиации летом отчасти эксергию весной, отрицательно – летние информацию Кульбака и вегетационный индекс. Максимальное значение параметра порядка, а, следовательно, максимум эксергии в апреле и энтропии летом наблюдается на верховых болотах и старых еловых лесах. Минимальное значение параметра, а следовательно, максимальное значение информации Кульбака и вегетационного индекса летом наблюдается на полях, относительно свежих вырубках, вывалах и, в меньшей степени, в лесах с преобладанием лиственных и лесах расположенных в наиболее дренированных позициях. Данный параметр порядка отражает видимо перераспределение влаги рельефом. Весной, в период избыточного увлажнения эксергия верховых болот приближается к эксергии хвойных и это подобие верховых болот и хвойных лесов по-видимому определяет тот факт, что эксергия в апреле в большей степени определяется не первым параметром порядка, отражающим общую открытость территории, а вторым (табл. 1). В то же время лиственные леса и поля, расположенные преимущественно в наиболее дренированных позициях, на склонах моренных гряд, весной работают еще не так активно. В летний период верховые болота и старые хвойные леса обладают минимальным вегетационным индексом и информацией Кульбака, в то время как поля, активно зарастающие молодняками вырубки и лиственные леса на моренных грядах имеют максимальный вегетационный индекс и информацию.

Третий параметр порядка, описывает 7.5 % варьирования переменных. Параметр положительно связан с информацией и вегетационным индексом и отрицательно с энтропией отраженной солнечной радиации весной и осенью. Весной параметр так же положительно связан с эксергией. Максимальное значение фактор принимает на верховых болотах, и на склонах моренных гряд южной и юго-восточной экспозиции занятых преимущественно мелколиственными лесами, минимальное – на лугах, полях и в долинах рек. Таким образом, параметр порядка с одной стороны связан с весенне-осенней вегетацией верховых болот и с другой с перераспределением тепла рельефом, за счет чего холодные долины рек снижают продуктивность осенью и весной, а склоны гряд южной и юго-восточной экспозиций увеличивают. Однако возможно и другая трактовка вклада рельефа в этот параметр: речные долины преимущественно заняты мелколиственными лесами (ольха, ива), а в части речных долин древесная растительность сильно повреждена бобрами, что приближает их к вывалам. Соответственно, вегетировать леса в долинах

начинают позже лесов с преобладанием хвойных, и осенью заканчивают раньше, что объясняет минимальное значение параметра, положительно связанного с продукцией весной и осенью.

Четвертый параметр порядка, определяет 5.7 % варьирования термодинамических переменных. Вне вегетационного периода параметр отрицательно связан с информацией Кульбака и положительно с энтропией отраженной солнечной радиации, а в вегетационный период, наоборот, параметр порядка положительно связан с информацией Кульбака и вегетационным индексом и отрицательно – с энтропией. Пространственное варьирование параметра очевидно связано с рельефом территории: так, максимум параметра, и, соответственно максимум информации Кульбака и вегетационного индекса наблюдается на относительно дренированных моренных грядах с преобладанием лиственных лесов, в том числе на вырубках и вывалах, а минимум – на плоских межгрядовых понижениях, занятых лесами с преобладанием хвойных, и, в меньшей степени, верховыми болотами, а так же на сельскохозяйственных землях (сенокосы, пастбища). Таким образом данный параметр порядка отражает перераспределение тепла и влаги рельефом в течение лета, что обуславливает высокую продуктивность на относительно дренированных и теплых моренных грядах и низкую в вогнутых межгрядовых понижениях.

Многомерный анализ термодинамических переменных для территории заповедника позволил выделить четыре параметра порядка, в разной степени определяющих их пространственно-временное варьирование. Первый параметр порядка интерпретируется как открытость деятельной поверхности ландшафтного покрова и определяет общую теплоемкость биогеоценоза, регулируя тепловой поток и эксергию в течение всего года. Второй параметр можно интерпретировать как перераспределение влаги рельефом территории в весенний период, что определяет особенности сезонного хода продуктивности и информации Кульбака в различных позициях. Третий параметр порядка определяет сезонную динамику вегетационного индекса, видимо за счет перераспределения тепла и влаги рельефом. Четвертый параметр порядка так же определяет особенности сезонной динамики продуктивности и является, по всей видимости, результатом влияния рельефа в летний период на вегетационный индекс, информацию Кульбака и энтропию отраженной солнечной радиации.

Варьирование нагрузок позволяет оценить сезонную динамику преобразования солнечной энергии: нагрузки первого параметра порядка, определяющего эксергию и тепловой поток различны по знаку в течение вегетационного периода и вне его: зимой и ранней весной эксергия и тепловой поток отрицательно связаны с параметром, а в течение вегетационного периода тепловой поток связан с параметром уже положительно. Таким образом,

можно констатировать наличие принципиально различных фазовых состояний системы преобразующей энергию в течение вегетационного периода и вне его, при наличии снегового покрова. При наличии снегового покрова, чем больше открытость территории, тем ниже эксергия и тепловой поток, а в течение вегетационного периода тепловой поток тем больше, чем больше открытость. Открытостью так же положительно определяется вегетационный индекс осенью, что отражает осеннюю вегетацию на болотах и на зарастающих, некосимых лугах. Стоит отметить, что нагрузки для 14 из 20 сроков съемки информации Кульбака и энтропии отраженной солнечной энергии лежат на одном и том же факторе с противоположными знаками (преимущественно 2 и 3 параметры порядка), что свидетельствует о том, что эти две переменные определяются одним «энтропийно-информационным» процессом, сильно варьирующим во времени. Нагрузки вегетационного индекса для половины сроков, в основном в течение вегетационного периода, лежат на одном факторе с одним знаком с нагрузками информации Кульбака (параметры 2, 3, 4), что позволяет предположить наличие тесной положительной связи между информацией и продуктивностью.

Обобщая результаты многомерного анализа термодинамических переменных можно говорить о двух типах процессов, определяющих преобразование энергии биогеоценозным покровом: процесс, определяемый его собственной теплоемкостью, регулирующий тепловой поток и затраты энергии на эвапотранспирацию и процессы связанные с энтропией, информацией и производством биологической продукции. «Теплоемкостный»

процесс определяется только одним параметром порядка, в то время как второй «информационный» тремя параметрами, сменяющимися друг друга во времени. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследования преобразования энергии ландшафтным покровом Заповедника на основе пяти снимков Landsat [4], в ходе которого было установлено, что наиболее инвариантными являются поглощение солнечной энергии, эксергия и тепловой поток, а наименее инвариантными – энтропия отраженной солнечной энергии, информация Кульбака и вегетационный индекс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пузаченко Ю.Г. Методы анализа данных в экологических и географических исследованиях. М.: Academia. 2004. 407 с.
2. Пузаченко Ю.Г. Инварианты динамической геосистемы // Изв. РАН. Серия географич. № 5. 2010. С. 6-16
3. Пузаченко Ю.Г., Санковский А.Г., Климатическая обусловленность чистой продукции биосферы // Изв. РАН. Сер. географическая. 2005. № 5. С. 14-28
4. Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г. Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // Журнал общей биологии. Т 70. №2. 2009. С. 121-142
5. Хакен Г. Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: Изд-во Per Se. 2001. 353 с.
6. Cramer W., Kicklighter D., Bondeau A., Moore B., Churkina G., Nemry B., Ruimy A., Schloss A. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): comparison of NPP to climate and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) // Global Change Biology. 1999. V. 5. Issue 1. P. 1-15.
7. Jorgensen S.E., Svirezhev Y.M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Langford Lane Kidlington. Oxford. Elsevier. 2004. 369 p.

#### MULTIDIMENSIONAL ANALYSIS OF SOUTHERN TAIGA BIOGEOCENOSES THERMODYNAMIC VARIABLES ON THE BASIS OF REMOTE SENSING DATA

© 2012 R.B. Sandlerkiy

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS

The work is devoted to the definition of leading solar energy conversion processes by biogeocenotic cover of the southern taiga. For the territory of the Central Forest Biosphere Reserve (Tver region), based on multispectral satellite imagery (20 scenes) thermodynamic variables that characterize the main components of the energy balance of ecosystems are calculated. Using the method of principal components, from 100 thermodynamic variables (5 variables for each period, reflecting the consumption of energy through evapotranspiration, heat flux and the biological production) order parameters were derived - the independent thermodynamic processes that govern the conversion of solar energy by biogeocenotic cover.

**Key words:** solar energy, exergy, Kullback's information, order parameters.