

УДК 911.52, 528.8(15), 89.57.45

ОЦЕНКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАНДШАФТНОГО ПОКРОВА ПО МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ОТРАЖЁННОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ (LANDSAT) НА ОСНОВЕ НЕЭКСТЕНСИВНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Ю. Г. Пузаченко¹, А. Н. Кренке^{2,*}, М. Ю. Пузаченко²,
Р. Б. Сандлерский¹, И. И. Широная¹

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 13.11.2017 г.

Поступило 23.11.2017 г.

Обосновывается использование аппарата неаддитивной статистической механики для оценки термодинамических переменных экосистем на основе мультиспектральных измерений отражённой солнечной радиации. Параметр q принимается соответствующим условиям максимальной организации Фёрстера. На основе дистанционной информации (Landsat) рассчитываются энтропия, информация Кульбака, мера организации Фёрстера, свободная энергия, эксергия, связанная и внутренняя энергии, затраты энергии на эвапотранспирацию и фотосинтез для значений q -индекса, измеренного для каждого пикселя сцен спутника. Показано, что сезонная динамика q -индекса и меры организации полностью соответствуют следствиям, вытекающим из теории открытых неравновесных систем, и термодинамические переменные хорошо отражают текущее состояние экосистем.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, термодинамика, неаддитивная статистическая механика.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524873310-316>

Теоретическая основа термодинамики биосферы, опирающаяся на статистическую механику Больцмана—Гиббса—Шеннона (BGS) для неравновесных систем рассмотрена в работах Ю. М. Свищева [1] и С. Э. Ёргенсона [2]. Ими был предложен подход к оценке термодинамических переменных на основе мультиспектральной дистанционной информации, получаемой со спутников. Адекватность модели реальности можно доказывать, рассматривая варьирование термодинамических переменных во времени и пространстве. На основе анализа дистанционных измерений со спутников Landsat и MODIS [3–7] было показано, что изменение их во времени и пространстве хорошо согласуется с теорией неравновесных систем [8–11]. Энтропия биосферы минимальна, а информация Кульбака и эксергия максимальны в период максимальной интенсивности вегетации и при прочих равных условиях пропорциональны приходу солнечной радиации и массе функционирующей растительности.

Естественным развитием теории и методов оценки термодинамических параметров биосферы и экосистем на основе мультиспектральной дистанционной информации является использование более общей модели неэкстенсивной статистической механики (NSM), развитой Тсаллисом [12, 13]. Она вводится при допущении нелинейной формы взаимодействий между элементами системы. При этом модель BGS является частным случаем. Параметр q в NSM определяет нелинейность отношений между элементами. При этом сохраняется смысл всех термодинамических переменных: энтропии, информации Кульбака, эксергии, связанной и внутренней энергии. Как и в модели BGS, чем больше информация Кульбака, тем более неравновесна система и тем больше её полезная работа.

Параметр q в NSM отражает, в частности, масштаб корреляций между элементами системы. Чем больше q превышает единицу, тем больше внутренние корреляции и более организована система. При $q < 1$ система находится в состоянии дезорганизации [12]. В предлагаемом сообщении демонстрируется оценка термодинамических переменных на основе неэкстенсивной статистической механики Тсаллиса и показывается, что их использование углубляет понимание функционирования биосферы на уровне ландшафтного покрова.

¹ Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова
Российской Академии наук, Москва

² Институт географии
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: krenke-igras@yandex.ru

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ В СИСТЕМЕ NSM

В неаддитивной статистической механике [13] постулируется, что энтропия системы есть

$$S_q = \frac{1 - \sum_{i=1}^k p_i^q}{q-1},$$

где p_i — вероятность состояния i и $S_q^{\max} = \ln_q k$ — максимум энтропии при $p_i = \frac{1}{k}$, где k — число классов.

Информация Кульбака, оценивающая “расстояние” между равновесным и неравновесным состояниями системы, есть

$$K_q = \sum_{i=1}^k p_i \frac{[p_i/p_i^{ecv}]^{q-1} - 1}{q-1},$$

где p_i^{ecv} — вероятность класса i для равновесного состояния и при $q = 1$, тождественно информации в термостатике BGS.

Информация в системе Тсаллиса, также как и энтропия, неаддитивная, но общая схема взаимодействия систем остаётся той же, что и BGS:

$$R = Ex_q + TWS_q + DU_q,$$

где R — поглощённая радиация, Ex_q — эксергия (полезная работа), TWS_q — связанная энергия (TW — тепловой поток, S — энтропия), DU_q — приращение внутренней энергии.

На основе мультиспектральной дистанционной информации по стандартным формулам [14] рассчитываем отражённую солнечную радиацию e_i^{out} в каждом спектральном канале i в Вт/м², приход энергии на поверхность e_i^{in} , принимаемый равным солнечной постоянной в канале i на момент измерения, и

$$p_i = \frac{e_i^{out}}{\sum_{i=1}^k e_i^{out}}.$$

Формула для оценки эксергии (полезной работы), предложенная Свирежеевым [1] для модели BGS в модели NSM, будет

$$Ex_q = E_{out} \left(K_q + \frac{(E_{out}/E_{in})^{1-q} - 1}{1-q} \right) + R,$$

где $E_{out} = \sum_{i=1}^k e_i^{in}$ — сумма отражённой радиации

в мультиспектральных каналах, $E_{in} = \sum_{i=1}^k e_i^{in}$ — сумма приходящей радиации и $R = E_{in} - E_{out}$. При $K_q = 0$ система находится в равновесном состоянии и $Ex_q = F_q$ — свободная энергия Гиббса.

АНАЛИЗ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Верификация физического смысла теории NSM применительно к дистанционной информации может быть осуществлена путём сопоставления результатов прямых измерений с предсказанием их поведения во времени и пространстве, определяемых теорией неравновесной термодинамики.

Такая проверка осуществляется на основе анализа пространственно-временной динамики q_{org} для 22 сцен Landsat с 1986 по 2011 г. для ландшафтов южной тайги для территории Центрально-Лесного биосферного заповедника и его охранной зоны. Примем, что каждому пикселю изображения, получаемого со спутника, соответствует конкретная экосистема с соответствующим спектром отражения солнечной радиации, по которому оцениваются все термодинамические переменные.

На рис. 1 приводится сезонный ход q_{org} и R_q . Очевидно, что их изменение полностью подчиняется теории самоорганизующихся открытых систем. Зимой, с декабря до начала апреля, среднее для ландшафта $q_{org} < 1$, система находится в состоянии дезинтеграции. С началом вегетационного периода $q_{org} > 1$, достигая максимума в июне, что указывает на активные процессы самоорганизации. Изменение во времени организации соответствует S -теореме Климонтовича. Организация имеет два максимума, соответствующие установившимся состояниями системы: зимой и летом с двумя переходными периодами в октябре—декабре и апреле. Анализ зависимости среднего для ландшафта q_{org} от приходящей солнечной энергии и погоды показал почти однозначную зависимость от накопленной суммы температур за 24 дня и приходящей радиации, причём собственное влияние приходящей радиации незначительно и лежит на грани достоверности.

В статистической модели рассматривались: текущая температура, накопленные температуры и осадки за 3, 6, 12, 24 и 36 дней. Полученная связь вполне естественна. Система переходит в состояние самоорганизации, когда накопленная за 24 дня сумма температур становится больше 100 °С (в сред-

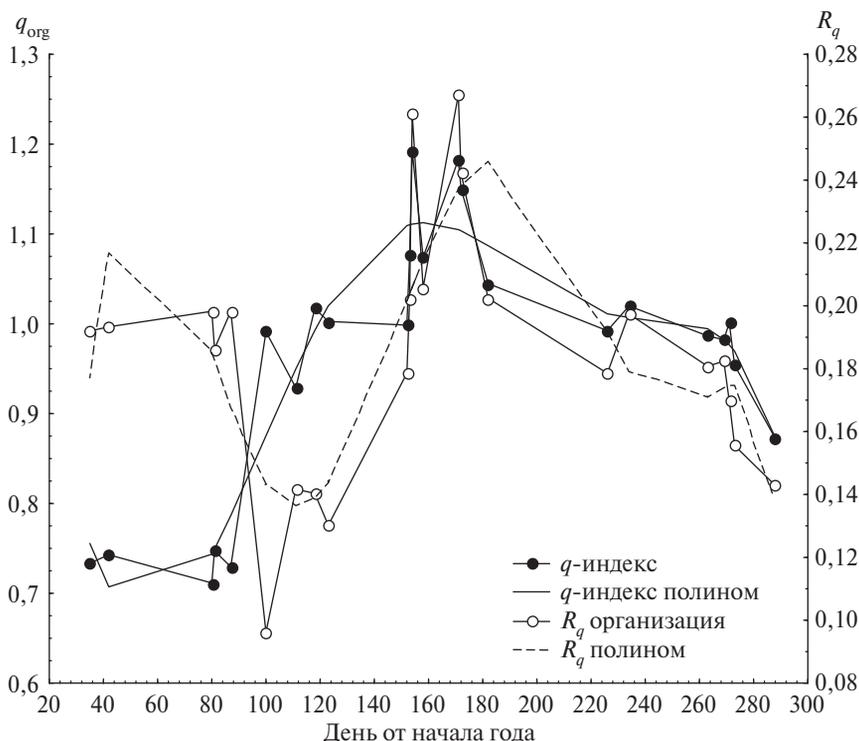


Рис. 1. Сезонный ход q_{org} -индекса и R_q (организация).

нем в $4,1^\circ$ в сутки) при приходе солнечной радиации в шести каналах больше 120 Вт/м^2 .

На рис. 2 показаны изменение q -индекса и меры организации в зависимости от состояния растительности в июне в период максимальной интенсивности вегетации. Минимальное значение q -индекса при относительно низкой организации характерно для старых еловых лесов. На зарастающих ветровалах их значение несколько увеличивается, но достигает максимума в молодых лесах. Затем по мере старения леса величины q -индекса и организации постепенно снижаются. Абсолютного максимума q -индекс достигает в луговых сообществах. Организация и q -индекс снижаются при переходе от относительно свежих вырубков к пашням и селитьбам. Верховые болота представляют собой уникальные образования с минимальной организацией и низкими значениями q -индекса, при этом q -индекс меньше на верховом болоте с сосной. Полученные соотношения, с одной стороны, отражают различия в способности к самоорганизации болотных, лесных и луговых сообществ, с другой стороны, лесные сообщества демонстрируют снижение способности к самоорганизации по мере их старения. В пределе лесная система стремится к состоянию с q -индексом, близким к единице.

Средние значения энтропии в системе BGS и эксергии больше, чем в системе NSM, а информация

Кульбака меньше, но во всех случаях дисперсия всех переменных и амплитуда больше в NSM. В целом же чем больше q , тем меньше эксергия и энтропия, но больше информация Кульбака. С позиции теории самоорганизации получаем, что с ростом организации снижается полезная работа системы.

Сравнив Ex_q с Ex_{bgs} , получим изменение эксергии в зависимости от q . Запишем эту величину как

$$\Delta_q = Ex_q - Ex_{bgs},$$

представим её в долях от прихода солнечной радиации E_{in}

$$\eta \Delta_q = \Delta_q / E_{in}$$

и назовём эффективностью самоорганизации. Эксергия включает в основном две формы работы: транспорт влаги и биологическую продукцию. Если допустить, что эвапотранспирация подчиняется классическим термодинамическим законам, то она обеспечивается затратами свободной энергии Гиббса, а биологическая продукция — отклонением системы от равновесия, т.е. информацией Кульбака. Тогда свободная энергия есть

$$F_q = E_{out} \frac{(E_{out}/E_{in})^{1-q} - 1}{1 - q} + R$$

и затраты энергии на биологическую продукцию есть

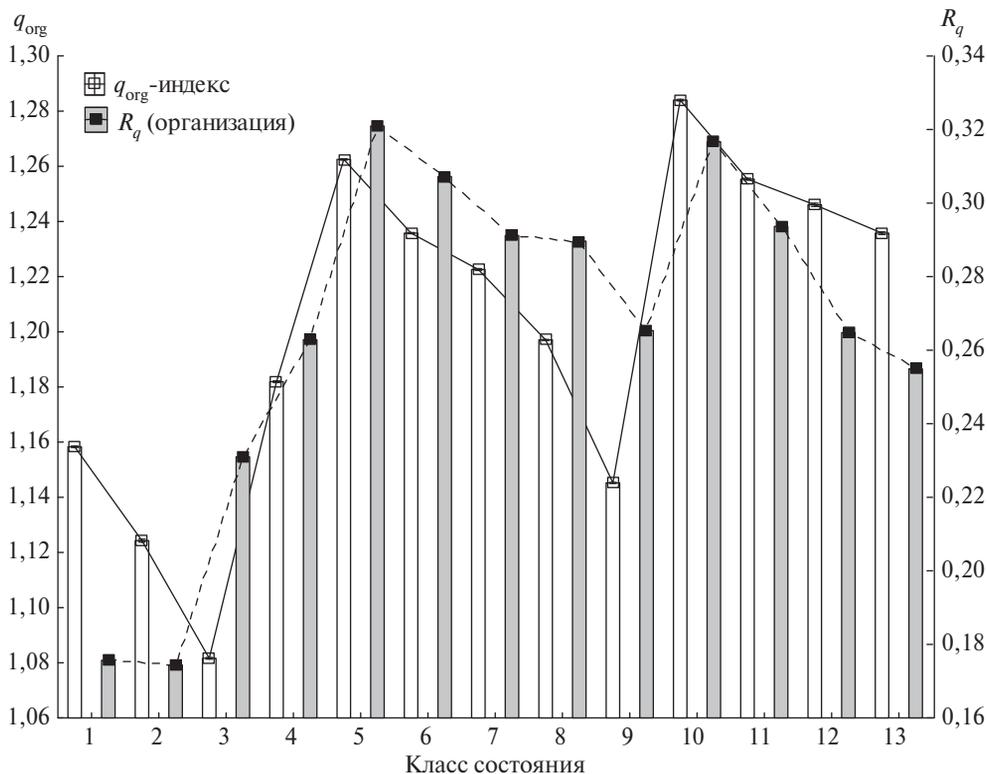


Рис. 2. Изменение q -индекса (q_{org}) и организации (R_q) в зависимости от состояния растительного покрова в июне: 1 — верховое болото, 2 — верховое болото с сосной, 3 — старый еловый лес, 4 — зарастающие ветровалы и вырубки, 5–9 — возрастные стадии восстановления елового леса, 10 — луга, 11 — зарастающие вырубки, 12 — луга на месте пашен, 13 — пашни и селитбы.

$$E_{fot} = Ex_q - F_q.$$

Представим энергию, теоретически затрачиваемую на фотосинтез, через КПД:

$$nF_q = \frac{F_q}{E_{in}}.$$

На рис. 3 показаны зависимость эффективности самоорганизации и КПД фотосинтеза от величины q -индекса. Как следует из реальных данных для 21 июня, в период максимальной интенсивности вегетации с ростом q экспоненциально снижаются затраты энергии на транспирацию и система более экономно использует влагу при экспоненциальном увеличении КПД фотосинтеза. Таким образом, для рассматриваемого класса систем самоорганизация, описываемая ростом q -индекса, повышает эффективность системы в том, что снижает затраты энергии на поддерживающие процессы, такие как транспорт влаги из почвы в атмосферу. Как следует из рис. 4, верховые болота и старые еловые леса испаряют влагу в среднем почти на уровне затрат свободной энергии при минимальном КПД фотосинтеза. В молодых лесах КПД фотосинтеза для лесных сообществ максимален, а затраты тепла на испарение существенно ниже, чем в старых лесах.

По мере старения леса КПД фотосинтеза и эффективность самоорганизации снижаются. На этом фоне самое высокое КПД и минимальные затраты тепла на испарение отмечаются в луговой растительности, которая с позиций самоорганизации может рассматриваться как наиболее совершенное сообщество. Отметим, что среднее КПД фотосинтеза по приведённой схеме расчёта затрат энергии на фотосинтез составляют около 2%, что полностью соответствует типичным средним оценкам эффективности этого процесса.

Следует отметить также большую информативность впервые использованной при анализе дистанционной информации меры организации R_q , по которой, в частности, строго отличаются верховые болота от лугов, с которыми они трудно различимы при сравнении их спектральных образов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные теоретические основания применения неаддитивной термодинамики для анализа мультиспектральной дистанционной информации и анализ реальных данных демонстрируют адекватное отображение параметрами NSM теоретических представлений о поведении открытых нерав-

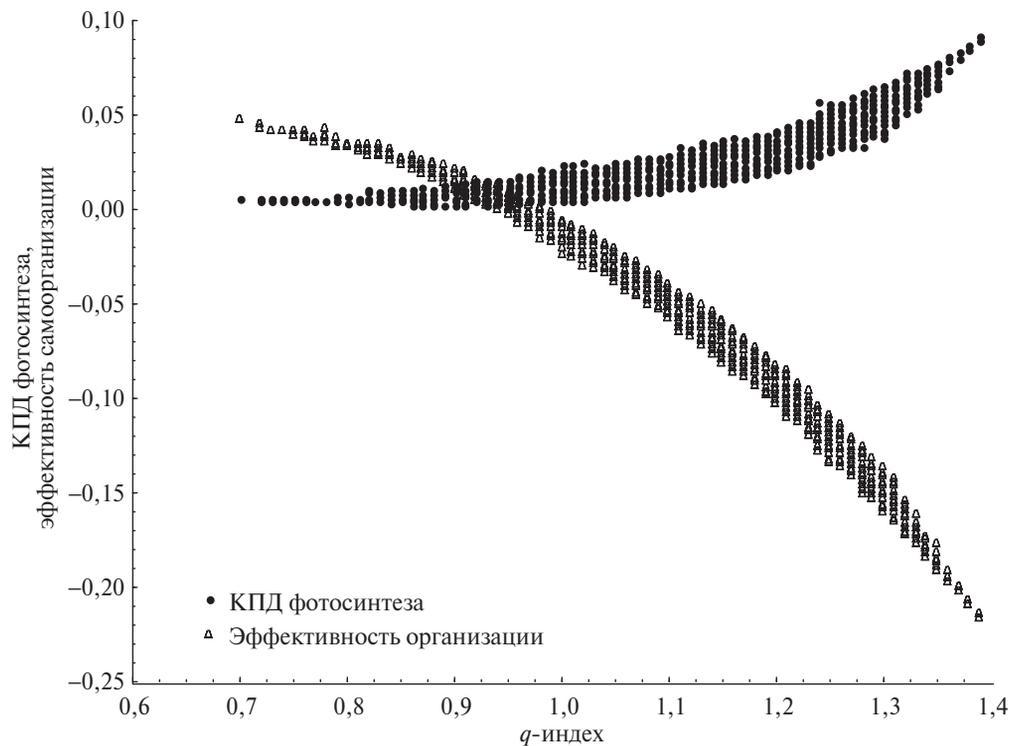


Рис. 3. Зависимость КПД фотосинтеза как функции неравновесности и эффективности самоорганизации, отражающей разность в затратах тепла на испарение относительно $q = 1$ от величины q -индекса.

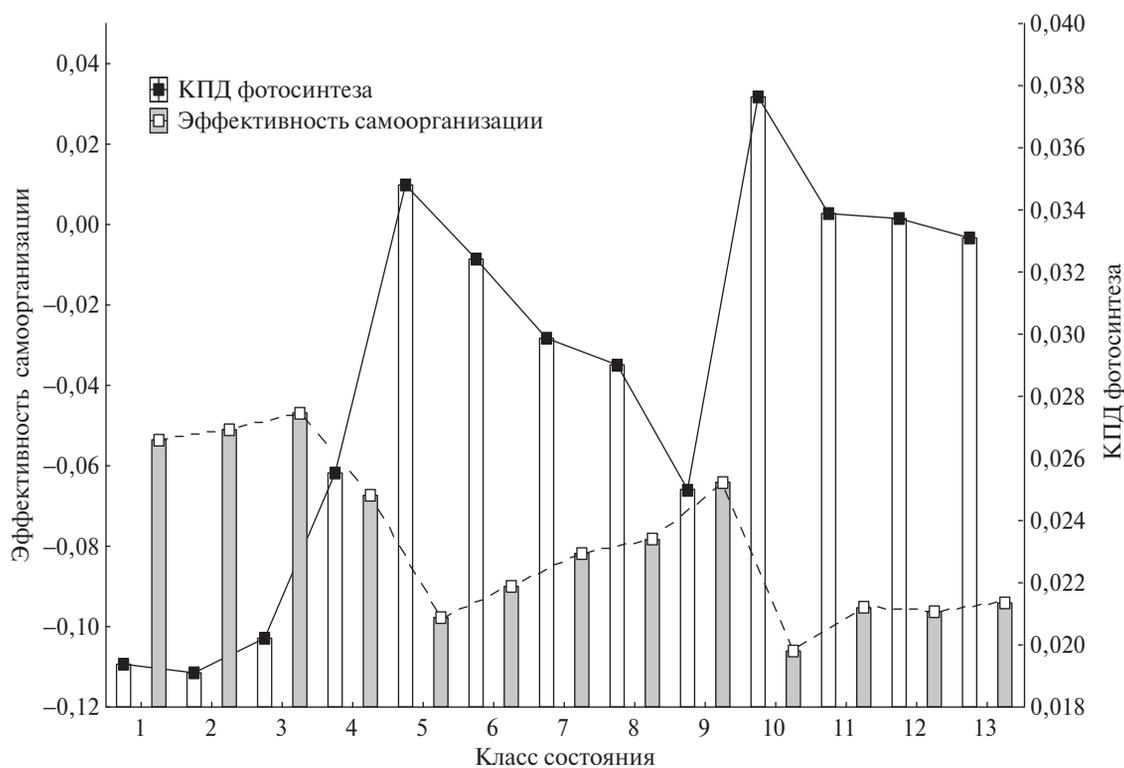


Рис. 4. Изменение КПД фотосинтеза и эффективности самоорганизации в зависимости от состояния растительного покрова в июне: 1 — верховое болото, 2 — верховое болото с сосной, 3 — старый еловый лес, 4 — зарастающие ветровалы и вырубki, 5–9 — возрастные стадии восстановления елового леса, 10 — луга, 11 — зарастающие вырубki, 12 — луга на месте пашен, 13 — пашни и селитьбы.

новесных самоорганизующихся систем. Мульти-спектральные дистанционные измерения в предложенной интерпретации позволяют оценить функциональное состояние экосистемы для каждого пикселя, определить степень её самоорганизованности, КПД фотосинтеза и эффективность использования влаги и выразить их в энергетических и относительных единицах измерения. Предложенный подход к преобразованию мультиспектральных измерений отличается от подхода, опирающегося на использование различных полуэмпирических индексов вегетации, физической обоснованностью каждой получаемой переменной в рамках общей теории термодинамики открытых неравновесных систем.

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-РГО № 17–05–41069 (разработка теории и расчёты), РФФИ № 17–05–00790а (разработка программного обеспечения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Svirezhev Y.M., Steinborn W.H., Potaz V.L.* Exergy of Solar Radiation: Information Approach // *Ecol. Modelling*. 2001. V. 145. P. 101–110.
2. *Jorgensen S.E., Svirezhev Y.M.* Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Oxford: Elsevier, 2004. 369 p.
3. *Сандлерский П.Б., Пузаченко Ю.Г.* Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // *Журн. общей биологии*. 2009. Т. 70. № 2. С. 121–142.
4. *Puzachenko Y.G., Sandlerky R.B., Svirejeva-Hopkins A.* Estimation of Thermodynamic Parameters of the Biosphere, Based on Remote Sensing // *Ecol. Modelling*. 2011. V. 222. P. 2913–2923.
5. *Puzachenko Y., Sandlerky R., Sankovski A.* Methods of Evaluating Thermodynamic Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by the Landsat Satellite // *Entropy*. 2013. V. 15. № 9. P. 3970–3982.
6. *Puzachenko Y.G., Sandlerky R.B., Krenke A.N., Olchev A.* Assessing the Thermodynamic Variables of Landscapes in the Southwest Part of East European Plain in Russia Using the MODIS Multispectral Band Measurements // *Ecol. Modelling*. 2016. V. 319. P. 255–274.
7. *Puzachenko Y.G., Sandlerky R.B., Sankovski A.G.* Analysis of Spatial and Temporal Organization of Biosphere Using Solar Reflectance Data from MODIS Satellite // *Ecol. Modelling*. 2016. V. 341. P. 27–36.
8. *Nicolis G., Prigogine I.* Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. N.Y.: Wiley, 1977. 512 p.
9. *Стратонович П.Л.* Нелинейная неравновесная термодинамика. М.: Наука, 1985. 478 с.
10. *Климонтович Ю.Л.* Уменьшение энтропии в процессах самоорганизации. S-Теорема // *Письма в ЖТФ*. 1983. Т. 7. С. 1412–1416.
11. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991. 234 с.
12. *Зарипов П.Г.* Самоорганизация и необратимость в неэкстенсивных системах. Казань: ФЭн, 2002. 251 с.
13. *Tsallis C.* Introduction to Nonextensive Statistical Mechanics. N.Y.: Springer Sci.+Business Media, 2009. 382 p.
14. *Chander G., Markham B., Helder D.* Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors // *Remote Sensing Environ.* 2009. V. 113. P. 893–903.
15. *Фёрстер Г.* О самоорганизующихся системах и их окружении // *Самоорганизующиеся системы*. М.: Мир, 1964. С. 113–140.

**ESTIMATION OF THE THERMODYNAMIC PARAMETERS
OF LAND COVER FROM MULTISPECTRAL MEASUREMENTS
OF REFLECTED SOLAR RADIATION (LANDSAT) IN TERMS
OF NONEXTENSIVE STATISTICAL MECHANICS**

**Yu. G. Puzachenko¹, A. N. Krenke², M. Yu. Puzachenko²,
R. B. Sandlerkii¹, I. I. Shironya¹**

¹*Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

²*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V.M. Kotlyakov November 13, 2017

Received November 23, 2017

The use of the apparatus of nonadditive statistical mechanics for the evaluation of thermodynamic ecosystem variables based on multispectral measurements of reflected solar radiation is discussed. The parameter q is accepted corresponding to the conditions of the Förster's maximum of organization. On the basis of remote information (Landsat) the entropy, Kullback information, Förster measure of organization, free energy, exergy, bound and internal energy, energy costs for evapotranspiration and photosynthesis for q -index values measured for each pixel of remote sensing scenes. It is shown that the seasonal dynamics of the q -index and the organization measures fully correspond to consequences that follow from the theory of open nonequilibrium systems, and thermodynamic variables reflect well the current state of ecosystems.

Keywords: remote sensing, thermodynamics, nonadditive statistical mechanics.