



**Издатель**

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»  
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

**ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ**

<http://ecopri.ru>

**№ 3 (37). Сентябрь, 2020**

**Главный редактор**

А. В. Коросов

**Редакционный совет**

В. Н. Большаков  
А. В. Воронин  
Э. В. Ивантер  
Н. Н. Немова  
Г. С. Розенберг  
А. Ф. Титов

**Редакционная коллегия**

Г. С. Антипина  
В. В. Вапиров  
**А. Е. Веселов**  
Т. О. Волкова  
Е. П. Иешко  
В. А. Илюха  
Н. М. Калинкина  
А. М. Макаров  
А. Ю. Мейгал  
В. К. Шитиков  
В. Н. Якимов  
A. Gugotek B.  
J. B. Jakovlev  
R. Krasnov  
J. P. Kurhinen

**Службы поддержки**

А. А. Зорина  
А. Г. Марахтанов  
Е. В. Голубев  
С. Л. Смирнова  
Н. Д. Чернышева  
М. Л. Киреева

**ISSN 2304-6465**

**Адрес редакции**

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: [ecopri@psu.karelia.ru](mailto:ecopri@psu.karelia.ru)

<http://ecopri.ru>





УДК 574.46, 577.34, 911.52, 528.813

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТРОПИЧЕСКИХ ЛИСТОПАДНЫХ ЛЕСОВ ЮЖНОГО ВЬЕТНАМА ПО ДАННЫМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

САНДЛЕРСКИЙ  
Роберт Борисович

к. б. н., *Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, [srobert\\_landy@mail.ru](mailto:srobert_landy@mail.ru)*

## Ключевые слова:

поглощенная солнечная радиация  
неравновесность  
самоорганизация  
эксергия  
инвариант

**Аннотация:** Рассматриваются термодинамические характеристики муссонных тропических лесов национального парка Каттъян, рассчитанные по 19 срокам съемки спутников семейства Landsat с 2000 по 2018 г. Методом главных компонент получены инварианты (параметры порядка) отдельных переменных и системы в целом и на их основе выделены типы термодинамической системы, соответствующие основным типам ландшафтного покрова территории. Показано существование двух режимов работы системы: конец влажного сезона и конец сухого сезона.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: А. В. Погорелов

Получена: 01 июля 2020 года

Подписана к печати: 28 сентября 2020 года

## Введение

Появление мультиспектральной дистанционной информации в значительной степени расширило возможности исследователей-географов и экологов. Однако техническое развитие средств измерений, с одной стороны, опережало развитие средств обработки, а с другой – во многом определялось практическими нуждами картографирования и инвентаризации природных ресурсов. В результате сложившаяся за последние десятилетия практика анализа мультиспектральной информации опирается преимущественно на оценки коэффициентов спектральной яркости в съемочных каналах и различных индексов, отражающих их соотношения. По сути такой подход основан на эмпирических и полуэмпирических знаниях об отражательной способности в различных диапазонах спектра, и его развитие сводится к описанию многообразия состояний отражательной поверхности в зависимости от различных внешних усло-

вий и уточнению связей между индексами и заданными свойствами экосистем. Соответственным образом развивается и методология обработки, сводящаяся к совершенствованию алгоритмов распознавания спектральных образов и их классификации (нейронные сети, метод опорных векторов, random forest и др.). По большому счету фундаментальная наука оказалась методологически не готова использовать мультиспектральные данные в качестве системы прямых измерений биофизических параметров экосистем – для оценки процессов функционирования (преобразования энергии) экосистемами использовались исключительно тепловые каналы (Price, 1982; Holbo, Luvall, 1989; Quattrochi, Luvall, 1999; Ma et al., 2003 и др.), при этом информация из каналов видимого спектра, если и использовалась, то только для оценки состояния растительного покрова. По-видимому, одной из основных причин, длительное время сдерживавших развитие «биофизической интерпретации»

мультиспектральных данных, было отсутствие теоретико-методологической основы, позволившей бы выйти за рамки традиционных климатических моделей, пренебрегавших мультиспектральными измерениями ввиду неполноты охватываемого спектра. Такую основу смогли предложить два выдающихся модельера С. Э. Йоргенсен и Ю. М. Свирежев в монографии «Towards a thermodynamic theory for ecological systems» (Jorgensen, Svirezhev, 2004). Опираясь на представления об экосистеме как открытой термодинамической диссипативной неравновесной системе, функционирующей благодаря преобразованию приходящей солнечной энергии, они обосновали и продемонстрировали возможность оценки основных ее биофизических параметров (термодинамических переменных): составляющих ее энергетического баланса и характеристик ее организации – производства энтропии и приращения информации.

В 2005 г. автор настоящего сообщения под руководством Юрия Георгиевича Пузаченко в своей бакалаврской работе адаптировал эту методологию к многоспектральной съемке Landsat 5, 7 и применил для южно-таежных ландшафтов Центрально-лесного заповедника (Сандлерский, 2005), где на тот момент уже был накоплен большой массив полевой информации о свойствах экосистем, а с 1998 г. функционировал комплекс пульсационных измерений потоков тепла и углерода eddy covariance. В наших первых работах по этой методике была проверена выполнимость основных балансовых соотношений и рассмотрены общие закономерности работы основных типов экосистем южно-таежного ландшафта: хвойных и лиственных лесов, лугов и верховых болот (Сандлерский, Пузаченко, 2009), оценена сезонная динамика термодинамических характеристик, вклад в них погоды, рельефа и состава растительности (Сандлерский, Пузаченко, 2014). В дальнейшем методика была адаптирована к съемочной системе Terra MODIS и применена для анализа термодинамической системы биосферы в целом (Puzachenko et al., 2011) и для ландшафтов Европейской равнины (Puzachenko et al., 2016). Результаты этих работ, с одной стороны, подтвердили универсальность термодинамической модели для различных съемочных систем и пространственных масштабов, с другой – позволили уточнить механизмы работы системы «климат – биосфера», показав вклад растительного покрова и лесной раститель-

ности в формирование общей циркуляции атмосферы, в том числе за счет механизма биотического насоса Горшкова (Makarieva, Gorshkov, 2006). При этом было показано, что изменчивость состояний растительного покрова на локальном уровне направлена на максимизацию поглощения энергии в области фотосинтетически активной радиации и, соответственно, производства биологической продукции. Таким образом, в соответствии с принципом необходимого разнообразия Эшби, разнообразие растительности является условием стабильного функционирования биосферы (Puzachenko et al., 2016). Дальнейшее развитие данного направления исследований видится нам, с одной стороны, в усложнении используемой модели до неэкстенсивной термостатики (Tsallis, 2009), допускающей нелинейность взаимодействия между ее элементами (пробные расчеты осуществлены для южно-таежных ландшафтов Центрально-лесного заповедника и Европейской равнины (Sandlersky et al., 2020)), с другой – расширении набора исследуемых биомов. В последнем отношении особый интерес представляет сравнение работы уже довольно хорошо изученной нами термодинамической системы бореальных лесов с работой тропических лесов.

В настоящем сообщении приводятся первые результаты анализа работы термодинамической системы тропических листопадных лесов Южного Вьетнама, где в национальном парке Катъен (11°26' с. ш., 107°24' в. д.) с 2012 г. функционирует комплекс для измерения потоков тепла и парниковых газов методом турбулентных пульсаций (eddy covariance) лаборатории биогеоценологии им В. Н. Сукачева и Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (Тропический центр) ИПЭЭ РАН. На территории парка в рамках работ Тропцентра с конца 1980-х гг. проводились многочисленные зоологические и ботанические исследования, а с 2017 г. автором настоящего сообщения начаты полевые исследования структуры и состава его растительного покрова на трансекте с регулярным шагом опробования 20 м. Таким образом, исследование термодинамической системы Катъена на основе мультиспектральной информации дает возможность расширить наши представления о функционировании тропических экосистем с опорой на многолетние натурные наблюдения.

## Материалы

Исследование осуществлено для экосистем национального парка Каттьен (входит в состав биосферного заповедника Донгнай), расположенного в 150 км к северо-западу от Хошимина (рис. 1а). Национальный парк представляет собой относительно целостный массив муссонного листопадного леса, занимающего южные отроги Центрального плато и долину реки Донгнай (рис. 1б). Ландшафты парка можно разделить на три основных вида (обобщено по: Кузнецов, Кузнецова, 2011 и Khokhlova et al., 2017): плоская равнина с базальтовым основанием, частично перекрытым раннеголоценовыми туфами под лагестроемиевыми (*Lagerstroemia* spp.), диптерокарповыми (*Dipterocarpaceae*) и их производными лесами (западная часть парка с основными абсолютными высотами 120–150 м) на бурых тропических маломощных глинистых и темноцветных глинистых почвах; сланцевая грядово-холмистая равнина с диптерокарповыми и их производными лесами на выпуклых и плоских поверхностях и бамбучниками на склонах на желтых ферралитных и тропических маломощных слабо развитых глинистых почвах (восточная часть с высотами до 300–350 м, т. н. Тигро-

вые холмы); озерно-аллювиальная равнина, занятая преимущественно грассландами, болотами и сезонно-заливаемыми низкоствольными лесами на аллювиальных супесчаных и глинистых почвах (северо-западная часть долины реки Донгнай и прилегающая к ней котловина озера Баусау). По сведениям А. Н. и С. П. Кузнецовых (2011, с. 17), во время Вьетнамской войны (1961–1975) растительный покров Каттьена подвергался воздействию дефолиантов, а в период с конца войны до 1989 г. его равнинная часть – выборочным вырубкам. В то же время некоторые исследователи (Vandekerkhove et al., 1994; Blanc et al., 2000) полагают, что западная, плоская часть парка представляет собой в значительной степени вторичные леса на месте расчисток. Оппонируя им, А. Н. и С. П. Кузнецовы (2011) утверждают, что вырубки были преимущественно приисковыми, и, опираясь на свой опыт исследования других лесных массивов Вьетнама, считают лесные древостои Каттьена «первичными долинными сезонно-заливаемыми, пройденными выборочными рубками, а также подвергшимися в годы войны США во Вьетнаме обработкам фитотоксикантами» (Кузнецов, Кузнецова, 2011, с. 42).

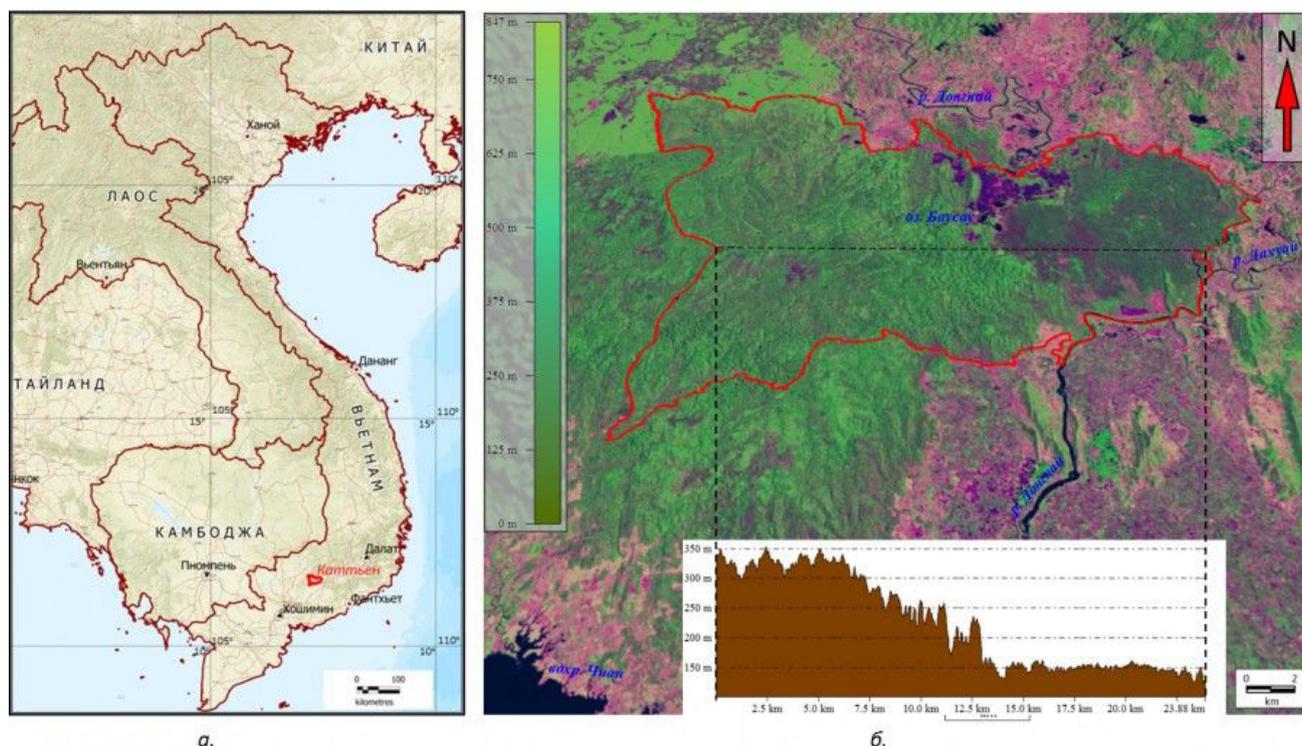


Рис. 1. Исследуемая территория: а – географическое положение Национального парка Каттьен; б – территория заповедника Каттьен, снимок Landsat 8 от 04.04.2020 (псевдоцвета) на цифровой модели рельефа SRTM. Пространственное разрешение 30 x 30 м

Fig. 1. Study area: a – Cat Tien National park geographical position; б – Cat Tien National park, Landsat 8 image on 04.04.2020 (false color image) on digital elevation model SRTM. Spatial resolution 30 x 30 m

Климат территории тропический муссонный с ярко выраженными влажным (май – октябрь) и сухим (ноябрь – апрель) сезонами (рис. 2). Среднегодовое количество осадков – 2400–2500 мм/год, среднегодовая температура – 26.4 °С, наиболее холодный месяц –

декабрь (23.9 °С), наиболее теплый – апрель (29.1 °С). Сумма осадков в месяцы влажного сезона – до 440 мм/мес., сухого – от 10–15 мм/мес. Относительная влажность воздуха в сухой сезон – 70–75 %, во влажный – 80–90 % (Deshcherevskaya et al., 2013).

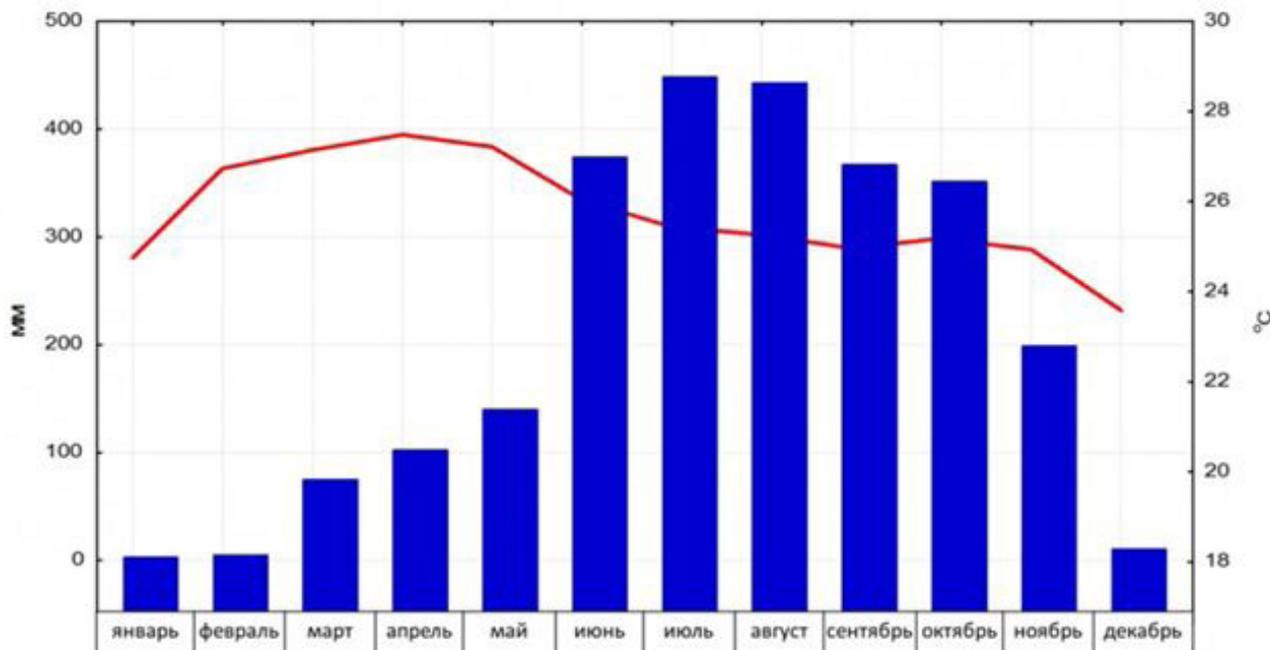


Рис. 2. Типичный годовой ход температуры и осадков по комплексу измерения потоков тепла и парниковых газов eddy covariance (Flux tower) в Национальном парке Каттьен, 2013 г.

Fig. 2. Typical annual variation of temperature and precipitations by the measuring complex of Eddy covariance (Flux tower) heat and greenhouse gas fluxes. Cat Tien National park, 2013

В качестве измерительной системы использована мультиспектральная съемка спутников семейства Landsat 5, 7, 8 с пространственным разрешением 30 x 30 м с 2000 по 2018 г. Было отобрано 19 безоблачных снимков, приходящихся на сухой сезон с октября по май (табл. 1). Сенсор Landsat 8 отличается шириной спектральных каналов от остальных, поэтому абсолютные значения полученных переменных для этих сцен отличаются от полученных для Landsat 5 и 7, что учитывается при анализе. По калибровочным постоянным сенсоров значения яркостей всех каналов, кроме теплового, пересчитываются в радиацию, отраженную деятельной поверхностью и зафиксированную сенсорами съемочной системы ( $\text{Вт/м}^2$ ). Значения яркости теплового канала пересчитываются в тепловой поток от деятельной поверхности и ее температуру. Приход солнечной радиации в каналах рассчитывается по солнечной постоянной для каждого канала с учетом высоты солнца и расстояния между Солнцем и Землей в момент съемки. Соответственно энергия, поглощенная в каждом

канале, рассчитывается как разность между приходом и отражением солнечной радиации.

## Методы

Термодинамические характеристики для экосистем рассчитываются по методике, предложенной С. Е. Ергенсеном и Ю. М. Свиричевым (Jorgensen, Svirezhev, 2004) и скорректированной для сенсоров семейства Landsat (Сандлерский, Пузаченко, 2009). В простейшем виде энергетический баланс неравновесной системы ( $B$ ) включает эксергию ( $EX$ ), связанную энергию ( $STW$ ), не способную совершать работу, и внутреннюю энергию системы ( $U$ ):

$$B = EX + STW + U.$$

Так как речь идет об одномоментной оценке термодинамических переменных в момент съемки, то правильнее говорить о приращениях этих величин. Эксергия – энергия, способная совершать полезную работу, которой в экосистеме является поддержание круговорота влаги. Связанная энергия – рассеяние энергии в среду с тепловым потоком

Таблица 1. Параметры используемых сцен съемочных систем семейства Landsat

| Дата съемки         | День от начала года (doy) | Высота солнца, ° | Приходящая солнечная энергия по каналам Landsat, Вт/м <sup>2</sup> | Съемочная система |
|---------------------|---------------------------|------------------|--|-------------------|
| 16 января 2009 г.   | 16                        | 42.22            | 134.24   | Landsat 5 TM      |
| 7 февраля 2011 г.   | 38                        | 48.92            | 141.84   | Landsat 5 TM      |
| 15 февраля 2008 г.  | 46                        | 50.6             | 145.01   | Landsat 5 TM      |
| 28 февраля 2007 г.  | 59                        | 54.41            | 151.69   | Landsat 5 TM      |
| 2 марта 2008 г.     | 62                        | 54.22            | 151.15   | Landsat 5 TM      |
| 18 марта 2008 г.    | 78                        | 57.93            | 156.55   | Landsat 5 TM      |
| 1 апреля 2007 г.    | 91                        | 61.7             | 161.41   | Landsat 5 TM      |
| 16 апреля 2001 г.   | 106                       | 60.34            | 157.91   | Landsat 5 TM      |
| 29 апреля 2000 г.   | 120                       | 59.87            | 156.05   | Landsat 5 TM      |
| 3 мая 2007 г.       | 123                       | 64.51            | 162.61   | Landsat 5 TM      |
| 11 мая 2010 г.      | 131                       | 63.51            | 160.6  | Landsat 5 TM      |
| 28 сентября 2000 г. | 272                       | 61.35            | 163.34   | Landsat 5 ETM+    |
| 8 октября 2018 г.   | 281                       | 61.9             | 97.43  | Landsat 8 OLI     |
| 26 октября 2013 г.  | 299                       | 58.34            | 94.99  | Landsat 8 OLI     |
| 18 ноября 2004 г.   | 322                       | 50.37            | 144.26   | Landsat 5 TM      |
| 24 ноября 2006 г.   | 328                       | 50.57            | 145.01   | Landsat 5 TM      |
| 10 декабря 2006 г.  | 344                       | 47.83            | 139.86   | Landsat 5 TM      |
| 18 декабря 2009 г.  | 352                       | 46.36            | 136.72   | Landsat 5 TM      |
| 20 декабря 2004 г.  | 354                       | 45.42            | 134.66   | Landsat 5 TM      |

и энтропией, приращение внутренней энергии – аккумуляция энергии, по-видимому, в форме накопления органического вещества. Эксергия оценивается как функция неравновесности спектров приходящей и отраженной солнечной радиации (приращение информации Кульбака). Чем более сходны эти спектры, тем более равновесен приемник (экосистема) потоку приходящей энергии и, соответственно, тем меньше приращение информации. Приращение информации, по Кульбаку, для съемки Landsat ( $K$ , нит):

$$K = \sum p_i^{out} \ln p_i^{out} / p_i^{in},$$

где  $p_i^{out} = e_i^{in} / E^{in}$  – доля пришедшей энергии ( $e_i^{in}$ ) в канале  $i$  от суммарной поступившей энергии ( $E^{in}$ ), а  $p_i^{out} = e_i^{out} / E^{out}$  – доля отраженной энергии ( $e_i^{out}$ ) в канале  $i$  от суммарной отраженной энергии ( $E^{out}$ ).

Эксергия солнечной радиации ( $Ex$ ) рассчитывается как:

$$Ex = E^{out}(K + \ln A) + B,$$

где  $E^{in}$  – приходящая солнечная энергия, Вт/м<sup>2</sup>,  $E^{out}$  – отраженная солнечная энергия,

Вт/м<sup>2</sup>,  $B = E^{in} - E^{out}$  – поглощенная энергия,  $A$  – альbedo –  $E^{out} / E^{in}$ .

Для оценки связанной энергии – диссипации энергии с тепловым потоком и энтропией – необходимо оценить энтропию отраженной солнечной радиации. Чем больше энтропия потока отраженной солнечной радиации, тем более равновесен поток отраженной солнечной радиации. Энтропия ( $S_{out}$ , нит) оценивается как:

$$S = - \sum p_i^{out} \ln p_i^{out}.$$

Связанная энергия ( $STW$ , Вт/м<sup>2</sup>):

$$STW = TWS,$$

где  $TW$  – тепловой поток от деятельной поверхности, зафиксированный тепловым каналом.

Приращение внутренней энергии системы ( $DU$ ) – переход поглощенной солнечной энергии во внутреннюю энергию системы, оценивается как остаток в балансовом уравнении поглощенной энергии ( $B$ ):

$$DU = B - Ex - STW.$$

Для оценки биологической продуктивно-

сти использовалось стандартное соотношение каналов – разность отражения в ближнем инфракрасном (*NIR*) и красном каналах (*RED*):

$$VI = NIR - RED.$$

Таким образом, в работе рассматривается пространственно-временное варьирование термодинамических переменных: поглощенная солнечная энергия ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), приращение информации (нит), энтропия отраженной солнечной радиации (нит), тепловой поток от деятельной поверхности ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), эксергия солнечной радиации ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), связанная энергия ( $\text{Вт}/\text{м}^2\text{нит}$ ), приращение внутренней энергии ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

Также рассчитывалась самоорганизация по Фёрстеру:

$$R = 1 - H/H_{max}$$

где энтропия системы  $H = -\sum p_i \log_2 p_i$ , а  $H_{max}$  – максимальная энтропия –  $\log_2 p_i^k$ , где  $k$  – количество дискретных классов. Соответственно, уровень самоорганизованности в системе возрастает при  $dR/dt > 0$ .

Анализ пространственно-временного варьирования термодинамических переменных осуществлялся в рамках представлений об экосистемах как о динамических системах, элементами которых является пиксель съемки (элементарная территориальная единица). Рассматривая временную динамику каждого элемента в пространстве термодинамических переменных, получаем их фазовые траектории, что дает возможность выделять устойчивые в пространстве-времени структуры. Для выделения и анализа этих структур и отношений, их порождающих, используются представления синергетики о параметрах порядка (инвариантных состояний) и управляющих параметрах (внешних факторов, таких как климат и рельеф). В качестве инструмента выделения параметров порядка (инвариантов) в анализе использован метод главных компонент.

## Результаты

На рис. 3 приведен сезонный ход средних значений термодинамических переменных для территории в целом в зависимости от приходящей солнечной энергии. Сезонный ход составляющих баланса поглощенной энергии (рис. 3а) и вегетационного индекса (рис. 3б) сходен и варьирует в зависимости от прихода. Пониженный приход солнечной энергии в октябре (см. табл. 1) и сопутствующие ему пониженные значения переменных обусловлены более узкими спектральными

диапазонами Landsat 8 по сравнению с остальными. Структурно-информационные характеристики демонстрируют в целом сходную динамику: к маю растут самоорганизация и приращение информации и падает энтропия отраженной солнечной радиации. Температура деятельной поверхности варьирует довольно хаотично, не следуя за приходом радиации, что свидетельствует, по-видимому, о влиянии на нее господствующих локальных воздушных масс. В отдельные сроки она опускается до 16–17 °С, что обусловлено дымкой, не различаемой сенсорами в видимой и ближней инфракрасной частях спектра. Средняя температура не поднимается выше 24 °С даже в самом конце сухого сезона, когда среднемесячные температуры по многолетним измерениям и измерениям на Flux tower стремятся к 29 °С (см. рис. 2). Видимо, этот факт обусловлен, с одной стороны, ранним временем съемки по местному времени ( $\approx 10:00$ ), а с другой стороны, тем, что в отличие от Flux tower измерения тепловых каналов сенсоров семейства Landsat, как было показано в работе Ю. Г. Пузаченко с соавторами (2019) при сравнении серии измерений Landsat и данных eddy covariance в ельнике сфагново-черничном, отображают тепловое поле приземного слоя атмосферы, охлаждаемого мощным потоком испарения от леса, а не собственно надкоронового пространства.

В целом можно констатировать увеличение активности работы рассматриваемой термодинамической системы с увеличением приходящей солнечной энергии, с одной стороны, а с другой – по мере возрастания количества осадков. Оценить вклад приходящей солнечной энергии ( $EIN$ ) можно на основе регрессионной модели, так, для затрат энергии на эвапотранспирацию (эксергия,  $EX$ ):

$$EX = 27.53 + 0.43EIN, \text{ при } R^2 = 0.77 \text{ (модель без 2-х сроков Landsat 8).}$$

Зависимость вегетационного индекса ( $VI$ ) от прихода солнечной радиации:

$$VI = -1.31 + 0.062 \text{ при } R^2 = 0.54 \text{ (модель без 2-х сроков Landsat 8).}$$

Структурно-информационные параметры и температура не зависят от прихода солнечной энергии. Наш опыт анализа зависимости термодинамических характеристик от погоды для бореальных экосистем в вегетационный период (Сандлерский, Пузаченко, 2014) показывает, что варьирование этих параметров связано с накопленными осадками и

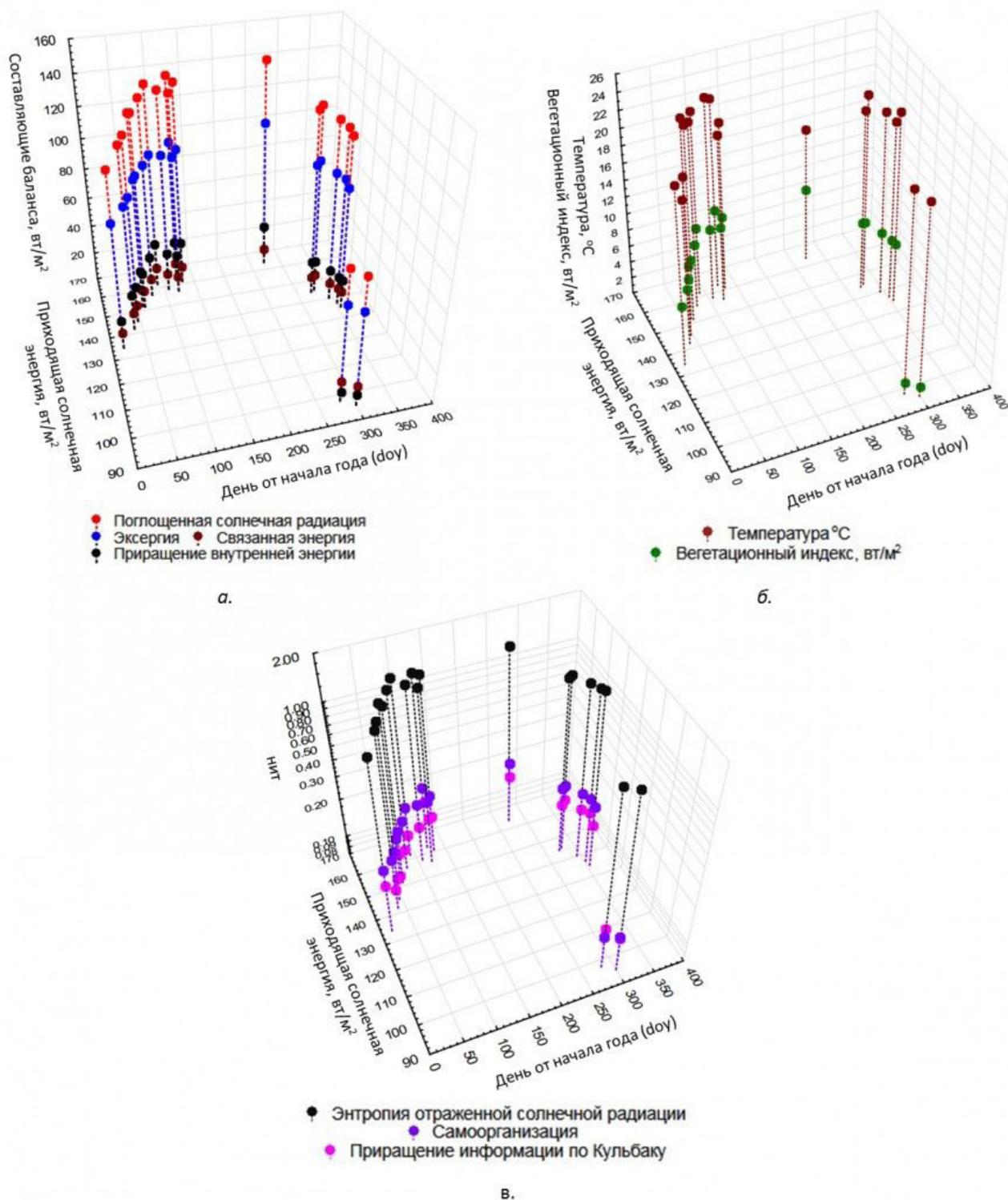


Рис. 3. Сезонный ход средних для территории значений термодинамических переменных в зависимости от прихода солнечной радиации: а – составляющие баланса; б – температура и продуктивность; в – структурно-информационные характеристики

Fig. 3. Seasonal variation of mean thermodynamic variables depending on incoming solar radiation: а – balance components; б – temperature and productivity; в – structural and informational characteristics

температурами. К сожалению, время работы Flux tower (с 2012 г.) не позволяет пока рассмотреть их влияние, однако по мере накопления новых съемок эта проблема будет решена. Другой сложностью при анализе се-

зонного варьирования термодинамических переменных в условиях муссонного климата стало отсутствие пригодных для обработки сцен в течение основного влажного сезона с июня по август, что, безусловно, мешает

оценке полной картины. Фактически пока мы не можем оценить одно из «экстремальных» состояний системы – с максимальными влагообеспеченностью и приходом солнечной радиации.

Для анализа пространственно-временного варьирования термодинамических переменных по всем срокам (19 сроков) обобщим каждую из них методом главных компонент. В табл. 2 приведены проценты варьирования, описываемые первыми двумя параметрами порядка (инвариантами) для каждой термодинамической переменной и основные сроки съемки, определяющие их. Также обобщим все переменные для всех сроков. Из таблицы видно, что пространственно-временное варьирование каждой переменной в среднем описывается двумя параметрами порядка на 70–80 %. Для большей части переменных первый инвариант определяет их пространственное варьирование в период с сентября по февраль (март), т. е. в конце влажного сезона. Эти переменные – поглощенная солнечная радиация, приращение внутренней энергии, вегетационный индекс и информационные характеристики. Выбиваются из этого ряда затраты энергии на эвапотранспирацию (эксергия), для ко-

торой в эти сроки варьирование определяет второй инвариант (6.69 %), и связанная энергия с температурой (тепловой поток), для которых первый инвариант определяет варьирование в период с ноября по май. Вторые инварианты, соответственно, описывают остальную часть сроков, т. е. конец сухого сезона. Таким образом, можно сделать два вывода: термодинамическая система рассматриваемого ландшафта может находиться в двух различных состояниях – конец влажного сезона и конец сухого сезона. На рис. 4 показано соотношение инвариантов для эксергии и вегетационного индекса для двух состояний в зависимости от инварианта поглощенной солнечной энергии. В целом для территории можно констатировать, что их соотношение меняется только в локальных областях, и предположить, что состояние системы в течение недоступного нам в наблюдениях влажного сезона принципиально не отличается.

Таблица 2. Инварианты (параметры порядка) для термодинамических переменных: процент варьирования, описываемый инвариантом, и сроки съемки по факторным нагрузкам, их определяющие (по 19 срокам съемки, табл. 1)

Таблица 2. Инварианты (параметры порядка) для термодинамических переменных: процент варьирования, описываемый инвариантом, и сроки съемки по факторным нагрузкам, их определяющие (по 19 срокам съемки, табл. 1)

| Термодинамическая переменная                     | Инвариант 1 |                    | Инвариант 2 |                    |
|--|-------------|--------------------|-------------|--------------------|
|  | %           | сроки              | %           | сроки              |
| Поглощенная радиация, Вт/м <sup>2</sup>          | 60.47       | сентябрь – февраль | 8.24        | февраль – май      |
| Эксергия, Вт/м <sup>2</sup>                      | 65.73       | февраль – май      | 6.69        | сентябрь – февраль |
| Связанная энергия, Вт/м <sup>2</sup>             | 78.39       | ноябрь – май       | 4.03        | май – ноябрь       |
| Приращение внутренней энергии, Вт/м <sup>2</sup> | 58.42       | сентябрь – февраль | 7.35        | февраль – май      |
| Температура (тепловой поток), °С                 | 61.34       | ноябрь – май       | 10.06       | май – ноябрь       |
| Вегетационный индекс, Вт/м <sup>2</sup>          | 67.58       | сентябрь – февраль | 9.43        | февраль – май      |
| Приращение информации по Кульбаку, нит           | 72.68       | сентябрь – февраль | 9.43        | март – май         |
| Энтропия отраженной солнечной радиации, нит      | 76.59       | сентябрь – февраль | 5.29        | февраль – май      |
| Самоорганизация, нит                             | 68.33       | сентябрь – март    | 9.84        | март – май         |
| Все переменные                                   |             | 45.66              |             | 19.65              |

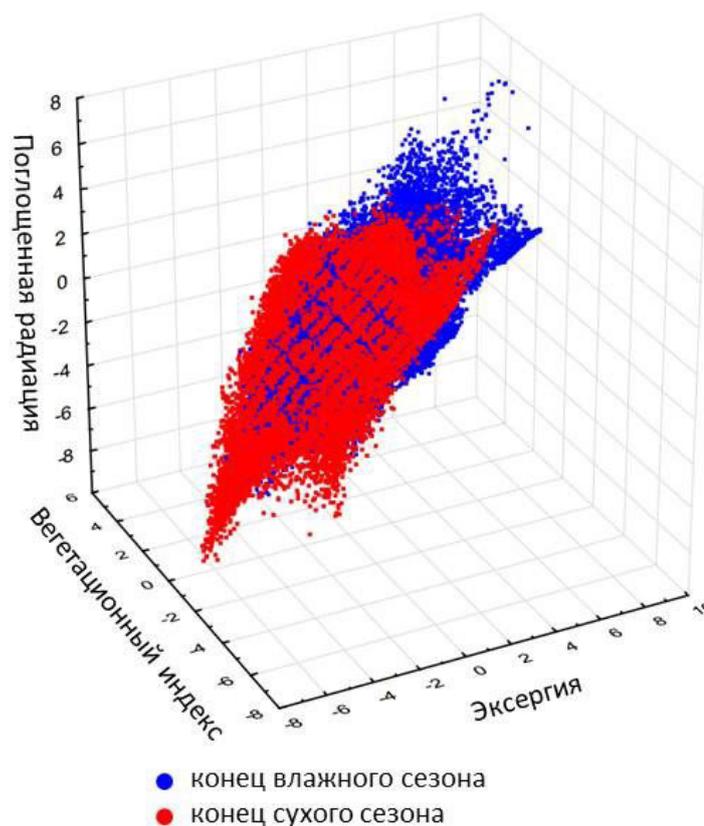


Рис. 4. Соотношение инвариантов поглощенной солнечной энергии, эксергии и вегетационного индекса для конца сухого и конца влажного сезонов

Fig. 4. The ratio between invariants of absorbed solar energy, exergy and vegetation index for the end of the dry and the end of the wet season

Для интегральной оценки термодинамической системы выделим параметры порядка по всем переменным всех сроков (по девять переменных для каждого из 19 сроков). Первые два инварианта описывают 45.66 и 19.65 % варьирования переменных. Первый инвариант определяет варьирование структурно-информационных характеристик и вегетационного индекса, а второй – составляющих энергетического баланса. При этом анализ факторных нагрузок показал, что тепловое поле (температура) в достаточной степени не описывается ни одним фактором, ни несколькими при увеличении их количества. Изображения инвариантов приведены на рис. 5. Согласно изображению, наиболее неравновесные, самоорганизованные и продуктивные экосистемы располагаются на склонах возвышенности в восточной части парка (Тигровых холмов) западной экспозиции и отдельных сланцевых грядах (гряда на юго-западе, на противоположном от парка берегу р. Донгнай). По-видимому, они представляют собой бамбучники с участием диптерокарпусов. Грассланды в районе

оз. Баусау, сельскохозяйственные культуры и прочие безлесные антропогенезированные территории на левом берегу Донгнай, не относящиеся к парку, имеют минимальную продуктивность, неравновесность и самоорганизацию. Значения этих переменных для лесов с преобладанием лагерстремиевых сообществ на плоской западной части парка находятся на среднем уровне. Значение второго инварианта, отображающего пространственное варьирование составляющих поглощенной солнечной радиации, т. е. главным образом затрат энергии на эвапотранспирацию (эксергия), максимально для водных объектов (оз. Баусау и р. Донгнай) и эрозионной сети Тигровых холмов. Некоторое повышение его значений наблюдается также по сезонно-затопляемым понижениям на плоской западной части парка. Так же, как и в случае с первым инвариантом, антропогенезированные территории на левобережье Донгнай имеют минимальное поглощение и затраты энергии на эвапотранспирацию.

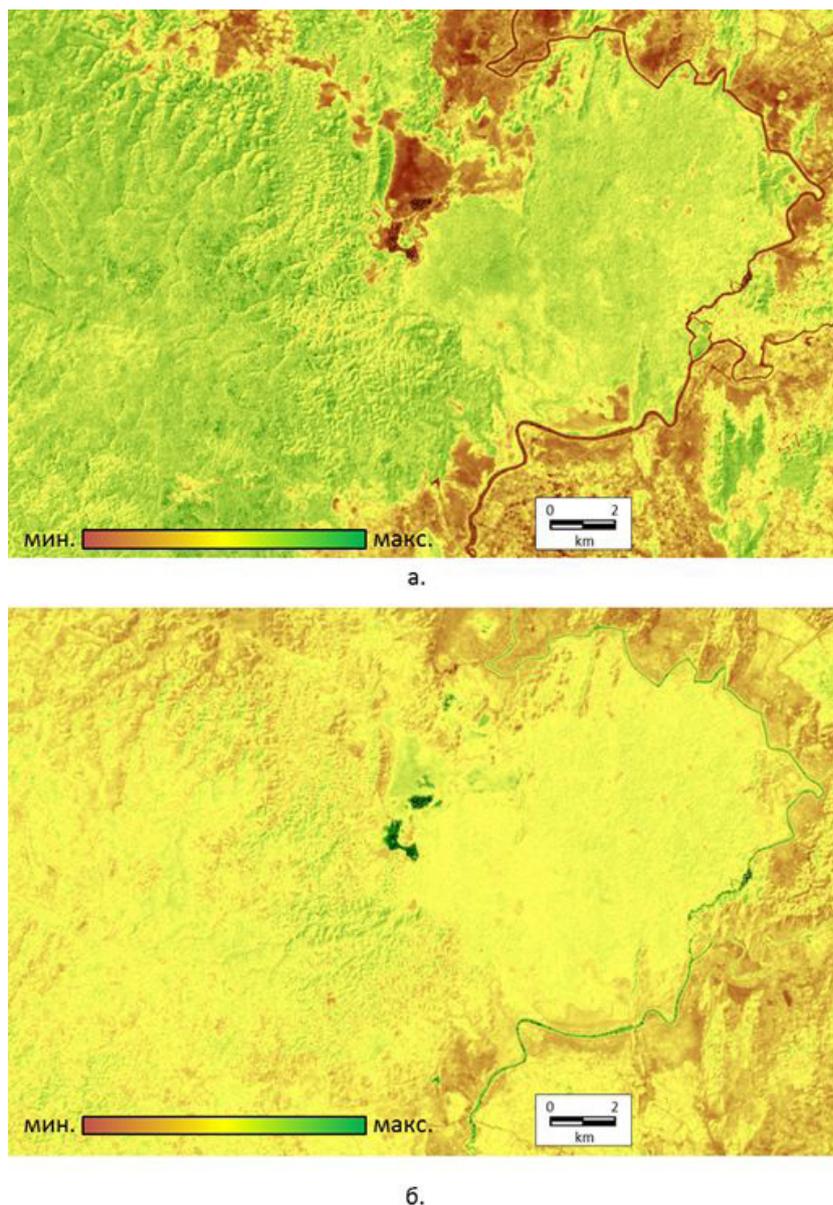


Рис. 5. Инварианты (параметры порядка) термодинамической системы: а – первый инвариант (45.66 %) – структурно-информационные характеристики и вегетационный индекс; б – второй инвариант (19.65 %) – поглощенная энергия и эксергия

Fig. 5. Invariants (order parameters) of thermodynamic system: а – the first invariant (45.66 %) – structural and informational characteristics and vegetation index; б – second invariant (19.65 %) – absorbed energy and exergy

На основе соотношения параметров порядка (инвариантов) в каждом пикселе можно выделить типы термодинамической системы. На рис. 6 приведен результат дихотомической классификации территории (третий уровень) по значениям двух инвариантов, обобщающих варьирование всех переменных и соотношение средних значений инвариантов для полученных типов. Основываясь на знании территории, визуальном дешифрировании снимков открытого доступа с высоким разрешением и общих представлениях о закономерностях варь-

рования термодинамических характеристик, можно интерпретировать полученные классы следующим образом:

1 – сельскохозяйственные земли (плантации кофе, гевеи, орехов и т. д.) и земли поселений с минимальными самоорганизацией, биологической продуктивностью и затратами энергии на эвапотранспирацию;

2 – луга, в том числе под выпасами, грасланды (слоновья трава) с невысокими самоорганизацией, продуктивностью и затратами на эвапотранспирацию;

3 – бамбучники с максимальными про-

дуктивностью и самоорганизацией и низкими затратами на эвапотранспирацию;

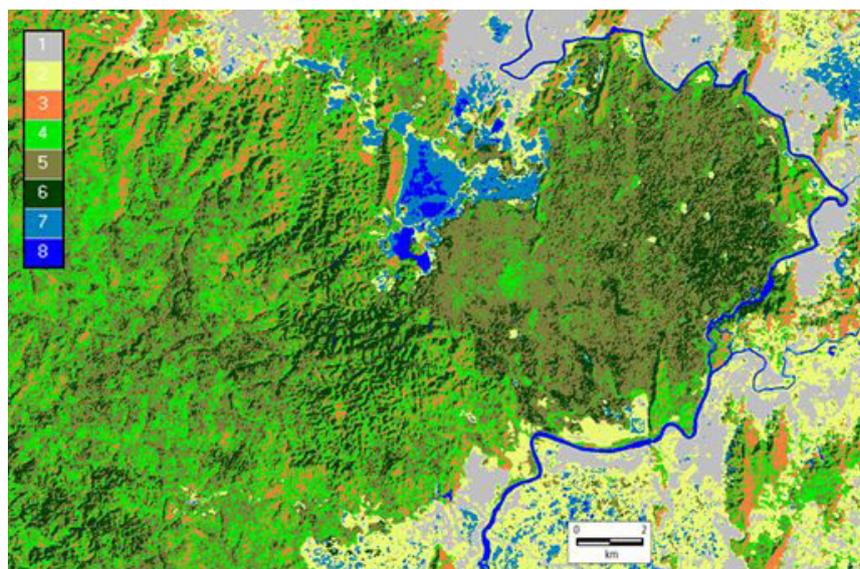
4 – молодые леса сложного состава со средними самоорганизацией и продуктивностью и средними затратами на эвапотранспирацию;

5 – леса с преобладанием лагерстремии со средними самоорганизацией и продуктивностью и высокими затратами на эвапотранспирацию;

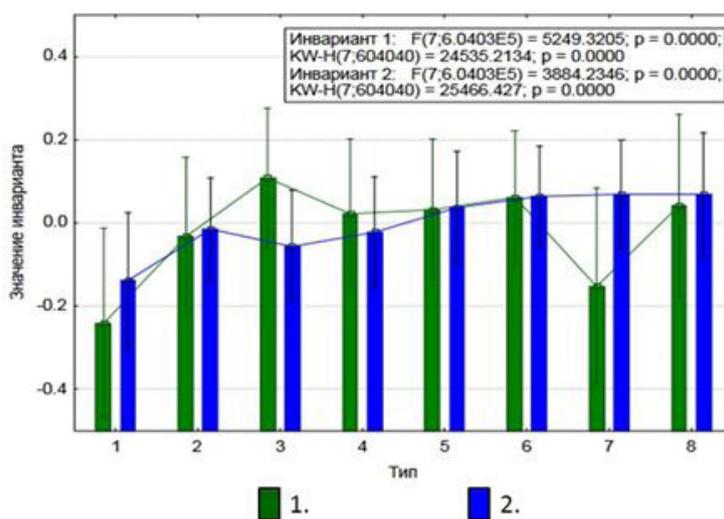
6 – леса с участием диптерокарповых с высокими продуктивностью, самоорганизацией и затратами на эвапотранспирацию;

7 – сезонно-заливаемые участки, занятые кустарниками и грассландами, с низкими продуктивностью и самоорганизацией и высокими затратами на эвапотранспирацию;

8 – водные объекты – оз. Баосау и р. Донгнай.



а.



б.

Рис. 6. а – типы термодинамической системы: 1 – сельскохозяйственные земли и селитьбы, 2 – луга и грассланды, 3 – бамбучники, 4 – молодые леса, 5 – лагерстремиевые леса, 6 – диптерокарповые леса, 7 – грассланды сезонно-заливаемые, 8 – водные объекты; б – box-plots для значений инвариантов по типам термодинамической системы: 1 – первый инвариант – структурно-информационные характеристики и вегетационный индекс, 2 – второй инвариант – поглощенная энергия и эксергия

Fig. 6. а – types of thermodynamic system: 1 – agricultural lands and settlements, 2 – meadows and grasslands, 3 – bamboos, 4 – young forests, 5 – lagestroemia forests, 6 – dipterocarp forests, 7 – seasonally flooded grasslands, 8 – water objects; б – box-plots for invariant values by the type of thermodynamic system: 1 – the first invariant – structural informational characteristics and vegetation index, 2 – the second invariant – absorbed energy and exergy

Можно говорить о том, что полученные типы термодинамической системы соответствуют основным типам сообществ для исследуемой территории, а их пространственная конфигурация в целом соответствует не только нашим представлениям, но и результатам других исследователей. Так, для территории Каттьена в 1993 г. на основе снимка Landsat 5 TM за 1990 г. была выполнена классификация ландшафтного покрова с верификацией по полевым геоботаническим описаниям (Vandekerkhove et al., 1993). Приведенная там картосхема в целом сходна с полученной нами.

## Заключение

Осуществленный анализ показал сходство устройства термодинамической системы листопадного тропического леса с работой бореальных лесов в аспекте существования двух функциональных подсистем: собственно термодинамической, отвечающей за транспорт влаги, и структурно-информационной, связанной с производством биологической продукции. Как и для бореальных лесов, для тропических выделяется два различных состояния системы, однако, если для бореальных наличие этих состояний обусловлено сезонным варьированием прихода солнечной энергии и напрямую определяется соотношением теплового потока (температуры) от деятельной поверхности и затрат тепла на испарение (зимой чем боль-

ше поглощение и затраты тепла на испарение, тем больше тепловой поток, а летом наоборот – чем больше поглощение и затраты на испарение, тем тепловой поток меньше), то для тропических лесов такой закономерности нет. Как в конце сухого сезона, так и в конце влажного температурное поле в целом слабо положительно связано с приходом солнечной энергии, ее поглощением и затратами на испарение, что свидетельствует о его регуляции режимом локальной циркуляции и осадков. Выделенные типы термодинамической системы являются хорошей основой планирования дальнейшего анализа сезонной динамики переменных, а также планирования полевых исследований для оценки свойств экосистем, определяющих их варьирование. В то же время полученное их отображение (см. рис. 6) заставляет предполагать наличие искажений, обусловленных ранним временем съемки. Так, территории с наибольшим поглощением и, соответственно, затратами энергии на эвапотранспирацию приурочены к склонам, обращенным на северо-запад, т. е. наиболее затененным. Таким образом, для дальнейшего исследования необходимо оценить вклад рельефа в термодинамические характеристики, что осуществляется на основе стандартных статистических методов анализа цифровой модели рельефа и ее производных морфометрических характеристик.

## Библиография

- Кузнецов А. Н., Кузнецова С. П. Лесная растительность: видовой состав и структура древостоев // Структура и функции почвенного населения тропического муссонного леса (Национальный парк Кат Тьен, Южный Вьетнам) / Под общ. ред. А. В. Тиунова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. С. 16–43.
- Пузаченко Ю. Г., Байбар А. С., Варлагин А. В., Кренке А. Н., Сандлерский Р. Б. Тепловое поле южно-таежного ландшафта Русской равнины // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 2. С. 51–68.
- Сандлерский Р. Б. Сезонная динамика энергетических характеристик ландшафта по данным дистанционного зондирования // Вестник молодых ученых. Вып. II. Сборник лучших докладов Международной научной конференции студентов, аспирантов, и молодых ученых «Ломоносов – 2005». М.: МАКС Пресс, 2005. С. 62–71.
- Сандлерский Р. Б., Пузаченко Ю. Г. Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // Журнал общей биологии. 2009. Т. 70. № 2. С. 121–142.
- Сандлерский Р. Б., Пузаченко Ю. Г. Термодинамика ландшафта на основе данных дистанционного зондирования // Вопросы географии. Вып. 138: Горизонты ландшафтоведения. М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. С. 185–214.
- Blanc L., Maury-Lechon G., Pascal J.-P. Structure, floristic composition and natural regeneration in the forests of Cat Tien National Park, Vietnam: An analysis of the successional trends // Journal of Biogeography. 2000. Vol. 27. P. 141–157.
- Deshcherevskaya O. A., Avilov V. K., Dinh Ba Duy, Tran Cong Huan, Kurbatova J. A. Modern climate of the Cát Tiên National Park (Southern Vietnam): Climatological data for ecological studies // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. Vol. 49. P. 819–838.
- Holbo H. R., Luvall J. C. Modeling surface temperature distributions in forest landscapes // Remote Sensing of Environment. 1989. Vol. 27. P. 11–24.

- Jorgensen S. E., Svirezhev Y. M. Towards a thermodynamic theory for ecological systems. Oxford, 2004. 369 p.
- Ma Y., Wang J., Huang R., Wei G., Menenti M., Su Z., Hu Z., Gao F., Wen J. Remote sensing parameterization of land surface heat fluxes over arid and semi-arid areas // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2003. Vol. 20. № 4. P. 530–539.
- Makarieva A. M., Gorshkov V. G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land // *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2006. № 3. P. 2621–2673.
- Khokhlova O. S., Myakshina T. N., Gubin S. V., Kuznetsov A. N. Morphogenetic features of soils in the Cat Tien National park, Southern Vietnam // *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50 (2). P. 158–175.
- Price J. C. On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales // *Journal of applied meteorology*. 1982. Vol. 21. P. 1111–1122.
- Puzachenko Y. G., Sandlersky 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 // *Ecological Modelling*. 2016. Vol. 319. P. 255–274.
- Puzachenko Y. G., Sandlersky R. B., Svirejeva-Hopkins A. Estimation of thermodynamic parameters of the biosphere, based on remote sensing // *Ecological Modelling*. 2011. Vol. 222 (16). P. 2913–2923.
- Quattrochi D. A., Luvall J. C. Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and applications // *Landscape Ecology*. 1999. № 14. P. 577–598.
- Sandlersky R., Puzachenko Y., Krenke A., Shironya I. Land cover thermodynamic characteristics defined by remote multispectral data based on nonextensive statistical mechanics // *Landscape patterns in a range of spatio-temporal scales / Landscape series*. 2020. Vol. 26. P. 111–118.
- Tsallis C. Introduction to nonextensive statistical mechanics. NY, 2009. 382 p.
- Vandekerkhove K., Wulf de R., Chin N. N. Dendrological composition and forest structure in Nam Bai Cat Tien National Park, Vietnam // *Silva Gandavensis*. 1993. Vol. 58. P. 41–83.

## **Благодарности**

Выражаем благодарность директору Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (Тропический центр) ИПЭЭ РАН Андрею Николаевичу Кузнецову за неоценимую помощь в сборе полевого материала на территории Национального парка Каттхен, не использованного в настоящей работе, но без которого она была бы невозможна. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-05-00539-а.

# THERMODYNAMIC SYSTEM OF TROPICAL DECIDUOUS FORESTS IN SOUTH VIETNAM BASED ON MULTISPECTRAL REMOTE SENSING DATA

**SANDLERSKY**  
**Robert Borisovich**

*PhD, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution,*  
*srobert\_landy@mail.ru*

**Keywords:**

absorbed solar radiation  
nonequilibrium  
self-organization  
exergy  
invariant

**Summary:** Thermodynamic characteristics of the monsoon rainforests of the Cat Tien National Park are considered, calculated for 19 periods of Landsat satellite surveys from 2000 to 2018. Invariants (order parameters) of individual variables and the system as a whole were obtained by the method of principal components. On their basis the types of thermodynamic system corresponding to the main types of landscape cover of the territory were identified. The existence of two modes of operation of the system was shown: the end of the wet season and the end of the dry season.

**Reviewer:** A. V. Pogorelov

**Received on:** 01 July 2020

**Published on:** 28 September 2020

## References

- Blanc L., Maury-Lechon G., Pascal J. P. Structure, floristic composition and natural regeneration in the forests of Cat Tien National Park, Vietnam: An analysis of the successional trends, *Journal of Biogeography*. 2000. Vol. 27. P. 141–157.
- Deshcherevskaya O. A., Avilov V. K., Dinh Ba Duy, Tran Cong Huan, Kurbatova J. A. Modern climate of the Cát Tiên National Park (Southern Vietnam): Climatological data for ecological studies, *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. Vol. 49. P. 819–838.
- Holbo H. R., Luvall J. C. Modeling surface temperature distributions in forest landscapes, *Remote Sensing of Environment*. 1989. Vol. 27. P. 11–24.
- Jorgensen S. E., Svirezhev Y. M. *Towards a thermodynamic theory for ecological systems*. Oxford, 2004. 369 p.
- Khokhlova O. S., Myakshina T. N., Gubin S. V., Kuznetsov A. N. Morphogenetic features of soils in the Cat Tien National park, Southern Vietnam, *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50 (2). P. 158–175.
- Kuznecov A. N., Kuznecova S. P. Forest vegetation: species composition and structure of forest stands, *Struktura i funkcii pochvennogo naseleniya tropicheskogo mussonnogo lesa (Nacional'nyy park Kat T'en, Yuzhnyy V'etnam)*, Pod obsch. red. A. V. Tiunova. M.: Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2011. P. 16–43.
- Ma Y., Wang J., Huang R., Wei G., Menenti M., Su Z., Hu Z., Gao F., Wen J. Remote sensing parameterization of land surface heat fluxes over arid and semi-arid areas, *Advances in Atmospheric Sciences*. 2003. Vol. 20. No. 4. P. 530–539.
- Makarieva A. M., Gorshkov V. G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2006. No. 3. P. 2621–2673.
- Price J. C. On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales, *Journal of applied meteorology*. 1982. Vol. 21. P. 1111–1122.
- Puzachenko Y. G., Sandlersky 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, *Ecological Modelling*. 2016. Vol. 319. P. 255–274.
- Puzachenko Y. G., Sandlersky R. B., Svirejeva-Hopkins A. Estimation of thermodynamic parameters of the biosphere, based on remote sensing, *Ecological Modelling*. 2011. Vol. 222 (16). P. 2913–2923.
- Puzachenko Yu. G., Baybar A. S., Varlagin A. V., Krenke A. N., Sandlerskiy R. B. Thermal field of the southern taiga landscape of the Russian plain, *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2019. No. 2. C. 51–68.
- Quattrochi D. A., Luvall J. C. Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and applications, *Landscape Ecology*. 1999. No. 14. P. 577–598.
- Sandlerskiy R. B., Puzachenko Yu. G. Analysis of thermodynamic properties of biogeocenosis based on remote sensing data, *Zhurnal obschey biologii*. 2009. T. 70. No. 2. P. 121–142.
- Sandlerskiy R. B., Puzachenko Yu. G. Landscape thermodynamics based on remote sensing data, *Voprosy*

- geografii. Vyp. 138: Gorizonty landshaftovedeniya. M.: Izdatel'skiy dom «Kodeks», 2014. P. 185–214.
- Sandlerskiy R. B. Seasonal dynamics of landscape energy characteristics based on remote sensing data, Vestnik molodyh uchenyh. Vyp. II. Sbornik luchshih dokladov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii studentov, aspirantov, i molodyh uchenyh «Lomonosov – 2005». M.: MAKS Press, 2005. P. 62–71.
- Sandlersky R., Puzachenko Y., Krenke A., Shironya I. Land cover thermodynamic characteristics defined by remote multispectral data based on nonextensive statistical mechanics, Landscape patterns in a range of spatio-temporal scales, Landscape series. 2020. Vol. 26. P. 111–118.
- Tsallis C. Introduction to nonextensive statistical mechanics. NY, 2009. 382 p.
- Vandekerkhove K., Wulf de R., Chin N. N. Dendrological composition and forest structure in Nam Bai Cat Tien National Park, Vietnam, Silva Gandavensis. 1993. Vol. 58. P. 41–83.