## **— ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ —**

УДК 911.52, 528.88, 574.46:47

# ОЦЕНКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

## © 2017 г. Юлия В. Вантеева<sup>1</sup>, Юрий Г. Пузаченко<sup>2</sup>, Роберт Б. Сандлерский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия <sup>2</sup>ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия e-mail: ula.vant@mail.ru, jpuzak@mail.ru, srobert\_landy@mail.ru

#### Поступила в редакцию 15.07.2016 г.

Аннотация. Рассматриваются результаты применения термодинамического подхода для изучения функционирования геосистем на основе дистанционной информации спутника Landsat для ландшафтов северо-восточного Прибайкалья. Продемонстрировано, что термодинамические переменные, рассчитанные по мультиспектральной сканерной съемке, хорошо воспроизводят типы геосистем, выделенные на основе традиционного ландшафтного картографирования, и позволяют рассматривать их функциональные особенности. Показано, что в условиях континентального климата во времени максимально варьируют энтропия и приращение информации, отражающие саморегуляторные возможности геосистем. Это варьирование определяется в первую очередь высокой чувствительностью геосистем к флюктуациям увлажнения, отображаемым в дальних инфракрасных каналах. Сравнение полученных для исследуемой территории термодинамических характеристик с аналогичными оценками для восточноевропейских ландшафтов показывает, что при общей воспроизводимости результата, Прибайкалье обладает спецификой реакций работы системы на погодные условия. Она определяется сложным сочетанием орографии, резко континентальным климатом и влиянием озера Байкал.

*Ключевые слова:* информация, эксергия, энтропия, мультиспектральные измерения, погодные условия, пространственно-временное варьирование.

DOI: 10.7868/S0373244417060093

# ASSESSMENT OF THERMODYNAMIC VARIABLES OF GEOSYSTEMS IN THE NORTHEASTERN BAIKAL REGION BASED ON MULTISPECTRAL REMOTE INFORMATION

## Yuliya V. Vanteeva<sup>1</sup>, Yurii G. Puzachenko<sup>2</sup>, and Robert B. Sandlerskii<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia <sup>2</sup>Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia e-mail: ula.vant@mail.ru, jpuzak@mail.ru, srobert\_landy@mail.ru

### Received July 15, 2016

**Abstract.** The results of applying the thermodynamic approach to study the functioning of geosystems based on remote sensing data of Landsat satellite for landscapes of the Northeastern Baikal region are discussed. It is demonstrated that the thermodynamic variables calculated using the multispectral scanner imagery reproduce well the types of geosystems allocated based on traditional landscape mapping and allow examining their functional characteristics. It is shown that in condition of continental climate the entropy and the increment of information, reflecting the self-regulatory possibility of geosystems, have the maximum variation during the time. This variation is primarily determined by a high sensitivity of geosystems to moisture fluctuations that are displayed in the far-infrared channels. The comparison of thermodynamic characteristics obtained for the study area with similar estimations for the Eastern European landscapes shows that under the general reproducibility of the result, the Baikal region has the specificity of the system response on weather conditions. It is determined by a complex combination of the orography, sharply continental climate and by the influence of the Baikal Lake.

*Keywords:* information, exergy, entropy, multispectral measurements, weather condition, spatiotemporal variation.

Постановка проблемы. В качестве основной функции ландшафта можно рассматривать преобразование солнечной энергии. Если принимать, что ландшафт и его территориальные составляющие являются неравновесными, открытыми термодинамическими системами, то оценку его термодинамической работы можно получить по данным мультиспектральных дистанционных измерений спектральной энергетической яркости (radiance) и рассчитываемого на ее основе отражения солнечной энергии [11]. Использование этого подхода позволило получить реалистичное, физически интерпретируемое в рамках неравновесной термодинамики, отображение преобразования солнечной энергии на глобальном [12], региональном [14] и локальном уровнях [13]. Этот подход позволяет оценить полезную работу (эксергию), связанную (диссипативную) и внутреннюю энергию ландшафта. Термодинамика геосистем, образующих ландшафт, зависит от их свойств: состава растительности, почвы, положения в рельефе. Использование термодинамического подхода при анализе дистанционной информации позволяет исследовать пространственно-временную динамику термодинамических переменных конкретных геосистем и ландшафтного покрова региона в целом. Сравнение динамики этих переменных в разных регионах позволит выявить специфичность их функционирования в широком диапазоне климатических и орографических условий. Эта качественно новая информация о работе ландшафта будет иметь определенное теоретическое и практическое значение, а рассматриваемый подход откроет новые возможности в использовании спутниковых измерений отраженной солнечной радиации.

В предлагаемой работе рассматривается пространственно-временное варьирование термодинамических переменных, рассчитанных по серии сцен Landsat с 2005 по 2016 гг. для предгорных ландшафтов Баргузинского хребта (северо-восточное Прибайкалье), являющихся объектом полевых ландшафтных исследований Института географии им. В.Б. Сочавы.

Методика исследований. Теоретические основания. Для сложных открытых неравновесных диссипативных систем полезная работа (эксергия) при прочих равных условиях тем больше, чем более удалена система от равновесия [11]. Расстояние от равновесия измеряется информацией (дистанцией) Кульбака (K). При движении системы к равновесному состоянию информация стремится к нулю, а энтропия системы к максимуму. Эксергия (Ex) ландшафта есть функция поглощенной солнечной энергии (R). Кроме того, поглощенная энергия переходит в связанную энергию (*STW*), которая является произведением теплового потока (*TW*) и энтропии (*S*), и во внутреннюю энергию (*U*). Таким образом, общее уравнение энергетического баланса можно записать как:

$$R = Ex + STW + U.$$

Мультиспектральные спутниковые измерения отраженной солнечной радиации позволяют оценить составляющие баланса в охватываемых сенсором спектральных диапазонах в момент съемки. Поглощение солнечной радиации рассчитывается как разность между приходящей (солнечная постоянная с учетом высоты солнца и расстояния "Земля—Солнце") и отраженной солнечной энергией, фиксируемой сенсорами съемочной системы.

Расчет эксергии приходящей солнечной радиации основан на оценке отклонения измеренного поглощения солнечной энергии от гипотетического, равновесного поглощения, пропорционального приходящей энергии в солнечном спектре (солнечная постоянная). Это отклонение определяет степень неравновесности, или приращение информации (K), получаемое системой с приходом солнечной энергии:

$$K = \sum_{i=1}^{n} p_i^{out} \ln(p_i^{out} / p_i^{in}),$$

где *i* — номер спектрального канала при мультиспектральном или гиперспектральном измерениях, а  $p_i^{in} = E_i^{in} / E^{in}$  — доля пришедшей энергии в спектральном диапазоне *i* от суммарной пришедшей энергии ( $E^{in}$ ) и  $p_i^{out} = E_i^{out} / E^{out}$ , — доля отраженной энергии от суммарной отраженной ( $E^{out}$ ).

Эксергия приходящей солнечной радиации рассчитывается как:

$$Ex = E^{out}\left(K + ln \frac{E^{out}}{E^{in}}\right) + R.$$

Для оценки связанной энергии – диссипации энергии с тепловым потоком и энтропией, оценивается энтропия отраженной солнечной радиации. Чем больше энтропия потока отраженной солнечной радиации, тем более равновесна система, преобразующая солнечную энергию. Энтропия системы, преобразующей солнечную энергию, рассчитывается следующим образом:

$$S = -\sum_{i=1}^{n} p_i^{out} \ln p_i^{out}.$$

Связанная энергия равна произведению энтропии и теплового потока, измеренного сенсором спутника в температурном, инфракрасном диапазоне, а приращение внутренней энергии, получаемое системой с приходящей солнечной радиацией (DU) определяется через замыкание балансового уравнения. Статистическая проверка соотношений между этими переменными, рассчитанными по данным съемочных систем Landsat 5 TM и Landsat 7 ETM+ за различные сезоны [8], показала, что реальные измерения не противоречат физическому смыслу уравнения баланса. Однако использование для оценок термодинамических переменных части солнечного спектра, измеряемого в каналах Landsat, позволяет квалифицировать результаты, как оценки переменных, подразумевая под этим отражение физического смысла процесса преобразования солнечной энергии, а не строго измеренные переменные для всего солнечного спектра. Для удобства сопоставления термодинамических переменных для различных сезонов года составляющие энергетического баланса были нормированы на приходящую солнечную радиацию.

Таким образом, в настоящем исследовании рассматриваются следующие термодинамические переменные:

- поглощенная солнечная радиация (R, вт/м<sup>2</sup>), в долях от приходящей ( $\eta R$ ),

— эксергия приходящей солнечной радиации  $(Ex, BT/M^2)$ , в долях от приходящей ( $\eta Ex$ ),

– связанная энергия (*STW*, вт/м<sup>2</sup>), в долях от приходящей ( $\eta$ *STW*),

— приращение внутренней энергии (DU, вт/м<sup>2</sup>), в долях от приходящей ( $\eta DU$ ),

приращение информации по Кульбаку (*K*, нат),

— энтропия отраженной солнечной радиации (*S*, нат),

— тепловой поток (TW, вт/м<sup>2</sup>), температура деятельной поверхности (°С).

Вместе с термодинамическими переменными рассматривается нормализованный дифференциальный индекс вегетации (*NDVI*), отражающий биологическую продуктивность, и нормированная на приходящую энергию сумма отражения в каналах видимого спектра в диапазоне 450–690 нм, в зоне фотосинтетически активной радиации (FAR):

$$NDVI = rac{E_{nir}^{out} - E_{red}^{out}}{E_{nir}^{out} + E_{red}^{out}},$$

$$FAR = 1 - rac{E_{blue}^{out} + E_{green}^{out} + E_{red}^{out}}{E_{blue}^{in} + E_{green}^{in} + E_{red}^{in}},$$

где  $E_{blue}^{out}$  – отражение в голубом канале (450–515 нм),  $E_{green}^{out}$  – отражение в зеленом канале (525–605 нм),  $E_{red}^{out}$  – отражение в красном канале (630–690 нм),  $E_{nir}^{out}$  – отражение в ближнем инфракрасном канале (760–900 нм).

Район исследований. Территория исследования расположена на северо-восточном побережье озера Байкал (отроги Баргузинского хребта, Хакусы) с координатами 55.30° и 55.43° с.ш. и 109.78° и 109.92° в.д. (рис. 1). Климат — резко континентальный, однако суточный и годовой ход температуры значительно сглаживается благодаря влиянию водных масс Байкала. Наиболее холодный месяц — январь (-23°C), самый теплый — август (+13°C). Годовое количество осадков в среднем составляет 450–500 мм и выпадает в основном в теплый период года. Высота снежного покрова побережья может составлять 50–80 см, а в подгольцовом и гольцовом поясах — от 80 до 250 см [5, 6].

Рельеф территории горный, резко рассеченный речными долинами, с перепадами высот от 480 до 1240 м над уровнем моря (рис. 2). На крутых склонах распространены каменистые осыпи и выходы горных пород, лишенные растительности. Побережье окаймляется нешироким поясом байкальских озерных террас (480-600 м). Почвы формируются преимущественно на хрящевато-щебнистом элювии гранитов, на участках речных долин почвообразование происходит на мощной толще рыхлых наносов. В горно-таежном поясе западных склонов Баргузинского хребта наибольшее распространение получили подбуры типичные и оподзоленные, подзолы и глеевые мерзлотнотаежные почвы. По долинам рек встречаются дерновые, бурые лесные типичные, подзолистые почвы [1, 2]. В районе исследования хорошо выражены подгольцовые, ложноподгольцовые, лесные светлохвойные и темнохвойные, и кустарниково-лугово-болотные природные комплексы [5].

Материалы и методы анализа. В летние сезоны 2011 и 2012 гг. проводились полевые работы по составлению ландшафтной карты для рассматриваемой территории на основе маршрутных наблюдений с использованием топографических карт, материалов лесотаксации, цифровой модели рельефа SRTM (исходное разрешение 30 м) (см. рис. 2) и космических снимков Landsat 7 ETM+, QuickBird. Для различных типов геосистем выполнены комплексные описания на 44 тестовых площадках. В результате была составлена ландшафтно-типологическая карта (масштаб 1:50 000) на уровне групп фаций [3, 10]



Рис. 1. Расположение района исследования.



Рис. 2. Цифровая модель рельефа территории (склоны освещены с юга).

в соответствии с факторально-динамическим подходом А.А. Крауклиса [4].

Для расчета термодинамических переменных использовались мультиспектральные снимки, полученные со спутников *Landsat 5 (TM) и Landsat 8 (OLI TIRS)*, за период с 2005 по 2016 гг. для разных сезонов (табл. 1).

Горные территории создают определенные проблемы для корректной оценки термодинамических параметров. Использованные продукты Landsat топографически корректированы, однако коррекция осуществляется на основе цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной на основе радарной топографической съемки по *SRTM* с разрешением 90 м. Однако удовлетворительная топографическая коррекция для Landsat может быть получена при разрешении ЦМР не менее 10 м на местности [15]. Соответственно необходимо исследовать возможные искажения в оценках поглощения солнечной радиации в зависимости от экспозиции и крутизны склонов в разные сезоны года. Анализ зависимости альбедо в шести спектральных каналах осуществлялся с помощью одномерного дисперсионного анализа (*ANOVA*). Результаты анализа учитывались в трактовке сезонного хода термодинамических переменных.

Для обобщения пространственно-временного варьирования термодинамических переменных (η*R*, η*Ex*, η*STW*, η*DU*, *T*, *K*, *S*, *NDVI*, *FAR*) за 20 сроков был проведен их многомерный анализ. Традиционно его целью является снижение размерности пространства анализируемых переменных, однако, Ю.Г. Пузаченко [8] показал, что многомерный анализ методом главных компонент позволяет выделить так называемые параметры порядка, физические процессы, определяющие явление, представленное многомерным пространством переменных. Процедура метода главных компонент позволяет оценить, с какими именно термодинамическими переменными связан полученный параметр.

Месяц	Число	Год	День от начала года	Съемочная система	Время, местное	Высота солнца (°)
Январь	13	2005	13	Landsat 5 TM	11:30	10.73
Февраль	12	2010	43	Landsat 5 TM	11:35	18.24
	26	2015	57	Landsat 8 OLI TIRS	11:44	23.9
Март	29	2009	88	Landsat 5 TM	11:31	35.30
Апрель	2	2016	92	Landsat 8 OLI TIRS	11:44	37.25
	25	2007	115	Landsat 5 TM	11:39	45.44
Май	6	2011	126	Landsat 5 TM	11:34	48.56
	21	2005	141	Landsat 5 TM	11:32	52.09
Июнь	12	2013	163	Landsat 8 OLI TIRS	11:46	55.79
	26	2006	176	Landsat 5 TM	11:37	55.13
Июль	14	2007	195	Landsat 5 TM	11:38	53.39
	20	2015	201	Landsat 8 OLI TIRS	11:44	52.76
	27	2006	208	Landsat 5 TM	11:37	50.93
Август	31	2013	243	Landsat 8 OLI TIRS	11:46	41.54
Сентябрь	13	2006	256	Landsat 5 TM	11:38	36.55
	26	2005	269	Landsat 5 TM	11:32	31.43
Октябрь	2	2013	275	Landsat 8 OLI TIRS	11:46	29.90
	7	2009	280	Landsat 5 TM	11:34	27.47
	8	2015	281	Landsat 8 OLI TIRS	11:44	27.62
Декабрь	24	2014	358	Landsat 8 OLI TIRS 11:44 9.89		9.89

Таблица 1. Сроки съемки и основные параметры используемых сцен Landsat

Первые наиболее значимые компоненты использовались для выделения типов термодинамической системы ландшафта на основе дихотомической классификации [14]. С помощью дисперсионного анализа определены термодинамические переменные, на основе которых выделяются типы термодинамической системы и рассмотрена их сезонная динамика.

Для интерпретации типов термодинамической системы была использована ландшафтно-типологическая карта. Связь между выделенными типами термодинамики и группами фаций ландшафтной карты оценивалась методом кросстабуляции. Далее. с помощью общего дискриминантного анализа оценивалась воспроизводимость термодинамических переменных в ландшафтной карте. Эта операция, с одной стороны, позволяет количественно скорректировать исходную карту, а с другой - на основе матрицы дистанций объединить группы фаций в основные типы термодинамической системы. Оценка различий преобразования солнечной энергии в геосистемах в целом и за разные сезоны года осуществлялась для обобщенных в классы термодинамической системы групп фаций.

Результаты. Пространственно-временное варьирование альбедо. Альбедо в январе зависит от экспозиции отражающей поверхности (рис. 3). На склонах западной и северной экспозиций альбедо во всех

каналах минимально. Оно резко увеличивается на склонах восточной и южной экспозиции. Соответственно, можно полагать, что топографическая коррекция продуктов семейства Landsat полностью не исключает влияния освещенности склонов. При этом к экспозиции особенно чувствителен четвертый, ближний инфракрасный канал, несколько менее чувствительны каналы в видимой части спектра и в наименьшей степени чувствительны дальние инфракрасные каналы. На рис. 4 показаны типы варьирования альбедо по территории, включая акваторию Байкала. Очевидно, что альбедо поверхности Байкала, покрытой льдом и снегом, свободно от влияния экспозиции и может рассматриваться как норма отражения поверхности, лишенной растительности. Из рис. 4 при его сравнении с изображением рельефа (см. рис. 2) следует, что аномально высокое отражение типично для относительно крутых южных склонов, занимающих сравнительно небольшую площадь. Поверхности Байкала соответствует пятый тип с альбедо в тех же каналах со средними значениями 0.4-0.5. Этот уровень альбедо достаточно типичен и для безлесных горных территорий.

Изменение соотношений альбедо в разных каналах, безусловно, влияет на оценки всех термодинамических переменных в зимние месяцы. Повышение альбедо в видимой части спектра будет



**Рис. 3.** Зависимость альбедо в шести каналах Landsat 5 от экспозиции поверхности (среднее значение для каждого градуса) для 13 января 2005 г. Каналы: А1 – голубой, А2 – зеленый, А3 – красный, А4 – ближний инфракрасный, А5 – первый дальний инфракрасный, А7 – второй дальний инфракрасный.



СРЕДНЕЕ АЛЬБЕДО В КАНАЛАХ						
Тип	A1	A2	A3	A4	A5	A7
1	0.22	0.13	0.10	0.12	0.03	0.02
2	0.34	0.20	0.15	0.12	0.02	0.02
3	0.28	0.20	0.20	0.37	0.09	0.06
4	0.42	0.31	0.31	0.34	0.05	0.04
5	0.55	0.46	0.51	0.59	0.07	0.04
6	0.67	0.60	0.68	0.88	0.12	0.08
7	0.86	0.82	0.98	1.24	0.16	0.11
8	1.18	1.20	1.49	1.86	0.25	0.17

Рис. 4. Типы альбедо отражающей поверхности для 13 января 2005 г.

приводить к увеличению энтропии и уменьшению приращения информации на южных экспозициях, а общее увеличение отражения приводит к снижению поглощенной радиации и эксергии, увеличению связанной энергии и снижению приращения внутренней энергии. Летом альбедо практически не зависит от экспозиции, что указывает на эффективность топографической коррекции при большой высоте солнца. Так или иначе, если этот фактор имеет принципиальное значение в преобразовании солнечной энергии в исследуемом ландшафте, то его влияние проявится при выделении параметров порядка пространственно-временного варьирования термодинамических переменных.

Параметры порядка термодинамической системы. Включенные в анализ сто восемьдесят переменных на 90% описываются семью компонентами. При этом три первых параметра описывают 81% варьирования переменных, а остальные – детали, определяемые в основном влиянием погоды. Три первых параметра порядка описывают работу системы летом, весной и зимой (рис. 5).

Стандартизованные коэффициенты регрессии отражают вклад соответствующей компоненты в описание варьирования в пространстве каждой термодинамической переменной. Как следует из материалов рис. 5а первый параметр порядка, описывающий 44.3% варьирования, положительно связан с летними значениями энтропии, связанной энергии и *NDVI* и, напротив, отрицательно – с поглощением радиации, эксергией, и приращением информации. Из материалов рис. 6а следует, что поглощение энергии, эксергия и приращение информации максимальны летом для поверхности Байкала.

Над сушей значения этих переменных существенно ниже и их пространственное варьирование относительно не велико с минимумом для безлесных территорий. Второй параметр порядка отражает термодинамику системы в весенний период (апрель, май). В этот период максимуму значения параметра порядка соответствуют значения всех термодинамических переменных кроме приращения информации (рис 5б). Таким образом, там, где максимум поглощения солнечной радиации и эксергии, выше температуры и другие переменные, приращение информации минимально, и система максимально близка к равновесию. В этот период значительная часть территории покрыта снегом, и на суше максимальные значения большинства переменных отражают работу снегового покрова. Обратим внимание на то,



**Рис. 5.** Отображение физического смысла параметров порядка по значениям стандартизованных коэффициентов множественной регрессии от параметров порядка к основным переменным: *1* – энтропия, *2* – приращение информации, *3* – поглощенная радиация, *4* – эксергия, *5* – связанная энергия, *6* – NDVI.

что акватория Байкала характеризуется средними значениями параметра порядка, а минимум поглощения солнечной радиации и эксергии с максимумом приращения информации соответствует в целом территориям с лесной растительностью.

Как следует из рис. 5в третий параметр описывает термодинамические переменные в зимний период. Максимуму соответствуют зимние максимумы энтропии, температуры, связанной энергии, NDVI и минимумы остальных переменных. Очевидно, что пространственное варьирование этого параметра почти точно соответствует рельефу (см. рис. 2): южные склоны наиболее яркие, северные наиболее темные. Очевидно, что в этом параметре порядка отражается рассмотренная выше зависимость альбедо в зимний период от экспозиции склонов. При этом акватория Байкала и относительно выровненные поверхности



Рис. 6. Отображение параметров порядка (светлый тон – максимальное значение):

а – первый параметр порядка – положительная связь: энтропия, температура, связанная энергия и NDVI летом;

б – второй параметр порядка – положительная связь: все составляющие баланса и энтропия весной;

в – третий параметр порядка – положительная связь: энтропия, температура, связанная энергия и NDVI зимой.

суши характеризуются средними значениями параметра, индицирующими зимнюю термодинамику системы, не зависящую от рельефа.

Классы термодинамической системы. Используя дихотомическую классификацию по параметрам порядка [14], можно последовательно с увеличивающейся детальностью выделить типы сезонного хода термодинамических переменных. На первом уровне классификация однозначно выделяет термодинамическую систему озера и суши. Ведущими в их разделении (табл. 2) являются энтропия отраженной солнечной радиации за летние месяцы, приращение информации в октябре и связанная энергия в июне. Сезонная динамика термодинамических переменных для озера и суши представлена на рис. 7.

Таблица 2. Термодинамические типы ландшафтного покрова для первого уровня классификации на основе одномерного дисперсионного анализа (ANOVA)

Термодинамическая переменная	Дата съемки	Вода	Суша
Энтропия (нат)	20.07.2015	1.278	1.721
	12.06.2013	1.257	1.735
	31.08.2013	1.274	1.704
Приращение ин- формации (нат)	02.10.2013	0.240	0.058
Связанная энергия (%)	12.06.2013	8.328	15.548

В соответствии с теорией неравновесной термодинамики вдали от равновесия энтропия минимальна, а приращение информации – максимально. Это соотношение строго выполняется на глобальном [12] и региональном [16] уровнях. В целом выполнялось оно и на локальном уровне для южной тайги Европейской части России [8, 13]. В норме система наиболее равновесна зимой и максимально неравновесна в июне и июле. На региональном уровне для северо-запада Русской равнины показано, что водные поверхности озер равновеснее, чем суша. В рассматриваемом регионе эти общие соотношения выполняются лишь частично. Как следует из материалов рис. 7а, энтропия суши в целом несколько увеличивается летом, в то время как энтропия водной поверхности снижается и достигает минимума в октябреноябре. Приращение информации на суше минимально в апреле и октябре с максимумами в декабре-январе и конце июня. Последнему максимуму приращения информации действительно соответствует локальный минимум энтропии, но устойчивой отрицательной обратной связи между ними не наблюдается. Вместе с тем, такое обратное соотношение выполняется для акватории Байкала. Динамика и величины приращения информации и энтропии позволяют утверждать, что акватория Байкала более неравновесная система, чем прилегающая к ней суша с максимумом неравновесности осенью. Зимой вплоть до марта они варьируют в относительно ограниченном диапазоне, а с переходом в летний режим работы их траектории резко расходятся (см. рис. 7а). Характерно значительное варьирование энтропии для суши



**Рис.** 7. Сезонная динамика термодинамических переменных поверхности озера и суши: a -энтропия (нат) (1 -озеро, 2 -суша) и приращение информации Кульбака (нат) (3 -озеро, 4 -суша); 6 -температура воздуха (°С) (1 -озеро, 2 -суша), поглощенная радиация (%) (3 -озеро, 4 -суша), эксергия (%) (5 -озеро, 6 -суша);  $p - \Phi P (1 -$ озеро, 2 -суша), NDVI (3 -озеро, 4 -суша);

в – ФАР (1 – озеро, 2 – суша), NDVI (3 – озеро, 4 – суша);

г – связанная энергия (%) (1 – озеро, 2 – суша), внутренняя энергия (%) (3 – озеро, 4 – суша).

в течение летнего периода по данным за различные годы. При этом варьирование ее для суши и акватории происходит строго в противофазе, что связано с отражением солнечной радиации в ближнем инфракрасном и красном каналах и, скорее всего, обусловлено погодными условиями вегетационного периода конкретного года измерения. Здесь же можно отметить региональную специфику рассматриваемой термодинамической системы и обратить внимание на то, что варьирование энтропии может отражать масштаб саморегуляции системы, преобразующей солнечную энергию за счет изменения соотношений отраженной радиации в разных каналах, которое поддерживает устойчивое функционирование системы в целом.

Эта гипотеза подтверждается устойчивостью в течение вегетационного периода доли поглощенной радиации и эксергии как для акватории, так и для суши (см. рис. 76). Поглощенная радиация и эксергия зимой для суши выше, чем для

покрытого льдом озера. Их минимальные значения и для суши и для льда наблюдаются в конце марта, в то время как минимум температуры отмечается в феврале. Летом наоборот поглощение радиации и эксергия водной поверхности значительно выше, чем для суши, а температура, соответственно, ниже. Поглощение солнечной радиации в области ФАР (см. рис. 7в) устойчиво в течение всего вегетационного периода и одинаково для воды и суши. Зимой, естественно, поглощение выше для суши. Индекс NDVI отражает соотношение отражения в ближнем инфракрасном и красном каналах. В сравнении с поглощением ФАР он более изменчив, но менее изменчив, чем энтропия и приращение информации (см. рис. 7а). Очевидно, что в варьирование общего отражения солнечной радиации существенный вклад вносит соотношение ближнего инфракрасного и красного каналов, и оно таково, что снижает варьирование NDVI, поглощенной радиации и эксергии. Для водной поверхности в полном соответствии с теорией *NDVI* всегда отрицателен, что указывает в среднем на большее отражение в красном, чем в ближнем инфракрасном каналах. Снижение энтропии и увеличение приращения информации для водной поверхности связано в первую очередь с увеличением отражения в течение вегетационного периода в голубом канале.

На рис. 7г показана динамика связанной и приращения внутренней энергий. Связанная энергия в среднем для суши больше, чем для акватории, но их сезонная динамика практически идентична. Минимальные потери энергии отмечаются весной и в первой половине лета, и им соответствует максимальное накопление внутренней энергии. Максимум связанной энергии и минимум внутренней приходится на декабрь. В целом это соотношение соответствует общим глобальным соотношениям этих переменных.

Классификация термодинамических переменных на втором уровне для суши выделяет два типа статистически значимо связанных с группами фаций сомкнутых лесов и редколесий (гамма-корреляция — 0.686 при  $\chi^2 = 39644.68$  при 24 степенях свободы) (табл. 3).

Выделенные типы различаются в первую очередь по поглощению солнечной радиации и эксергии в начале вегетационного периода и, естественно, что для сомкнутых лесов характерны более высокие значения этих переменных, чем для редколесий. На третьем уровне классификации типы термодинамической системы так же статистически значимо соответствуют определенному набору групп фаций, различая сомкнутые (в основном хвойные) леса, редкостойные и листопадные леса и редколесья на каменистых склонах, и сборную группу с разреженной растительностью, включающей в себя ерники, кедровый стланик, каменистые склоны и пляжи. Как и в первом случае, связь между типами термодинамической системы и группами фаций статистически значима, и поглощение солнечной радиации и эксергия в различные месяцы вносят в их дифференциацию наибольшее значение. На рис. 8а показаны восемь типов термодинамики, демонстрирующие общие закономерности организации ландшафтного покрова. Так как полученные типы хорошо согласуются с группами фаций, выделенными по традиционной методике ландшафтного картографирования, то естественно дать им характеристику через термодинамические переменные.

Чтобы получить полную оценку связи термодинамических переменных с группой фаций, используем дискриминантный анализ, в котором через термодинамические переменные воспроизводится оригинальная ландшафтно-типологическая карта (см. рис. 8б). Дискриминантный анализ 65% пикселей относит по их термодинамическим свойствам к одноименным (исходным) пикселям на карте. Остальные пиксели относятся к какомулибо иному классу. В целом термодинамическая специфичность выделенных при картографировании контуров групп фаций очень высокая (критерий Wilk's-Lambda -0.000066). На рис. 8в показаны несоответствия исходной карты и карты модифицированной дискриминантным анализом. Так как группы фаций в легенде упорядочены относительно друг друга по их подобию, то абсолютные значения разности их порядковых номеров отражают масштаб несоответствий. Ошибки хорошо маркируют границы контуров исходной карты и сосредоточены в отдельных мозаичных территориях, сложно воспроизводимых при визуальном картографировании. Таким образом, можно утверждать, что каждая группа фаций характеризуется специфичной термодинамикой.

Термодинамическая переменная	Дата съемки	Сомкнутые леса	Редколесья, ерники, пляжи и камни
Поглощенная радиация (%)	25.04.2007	79.7	51.2
	21.05.2005	88.6	68.9
Эксергия (%)	25.04.2007	49.4	21.6
	21.05.2005	64.4	37.6
	06.05.2011	60.4	40.04
Температура	24.12.2014	-14.2	-20.8
NDVI	21.05.2005	0.17	-0.04

Таблица 3. Термодинамические типы ландшафтного покрова для суши на втором уровне классификации на основе одномерного дисперсионного анализа (ANOVA)



#### Рис. 8.

а – типы термодинамической системы ландшафта на четвертом уровне классификации (темный тон – в среднем максимальное поглощение солнечной радиации и максимальная эксергия, светлый тон — минимальное); б – исходная ландшафтно-типологическая карта (1 – редкостойные лиственничные с кедровым стлаником и багульником болотным бруснично-зеленомошные леса с выходами горных пород крутых склонов; 2 – редкостойные сосновые с кедровым стлаником леса на каменных россыпях крутых склонов; 4 – пихтовые с кедровым стлаником кустарниковые разнотравно-злаковые леса на маломощных подбурах склонов преимущественно западной и южной экспозиции: 5 – лиственнично-кедровые бруснично-зеленомощные леса на почвах с развитым гумусовым горизонтом подножий склонов; 5а – Вторичные осиновые осоково-разнотравные леса на почвах с развитым гумусовым горизонтом подножий склонов; 6 – лиственнично-сосновые с багульником болотным леса на дерново-кислых почвах подножий склонов; 7 – кедрово-лиственничные брусничные с багульником болотным леса на маломощных подбурах склонов юго-западной и западной экспозиции; 7а – вторичные осиновые бруснично-разнотравные леса на маломощных подбурах склонов юго-западной и западной экспозиции; 8 – сосновые бруснично-зеленомошные леса на маломощных подбурах склонов средней крутизны; 8а – вторичные осиновые осоково-злаково-разнотравные леса на маломощных подбурах склонов средней крутизны; 9 – лиственничные с зарослями багульника болотного леса на маломощных подбурах на аллювиальных отложениях; 10 – редкостойные лиственнично-кедровые с багульником болотным бруснично-лишайниковые леса на подзолистых холодных почвах озерных террас; 11 – лиственнично-кедровые злаково-осоково-разнотравные леса на подзолистых холодных почвах озерных террас; 12лиственничные с кедровым стлаником и багульником болотным бруснично-зеленомошные леса на подзолистых холодных почвах озерных террас; 13 – редкостойные угнетенные лиственничные с куртинами кедрового стланика, ерника, багульника болотного и лишайниковые леса на подзолистых холодных почвах озерных террас: 14 – песчаногалечные пляжи; 15 - сосновые с примесью лиственницы бруснично-зеленомошные леса на подзолистых холодных почвах водоразделов; 16 - кедрово-пихтовые с кедровым стлаником осоково-разнотравные зеленомошные леса на таежно-мерзлотных почвах склонов преимущественно восточной экспозиции; 17- кедрово-лиственничные осоково-хвощевые леса с кедровым стлаником на таежно-мерзлотных почвах озерных террас; 18 – лиственничные бадановые леса на таежно-мерзлотных почвах ложбин и низких террас; 19 – угнетенные лиственничные с кедровым стлаником и багульником болотным бруснично-зеленомошные леса на таежно-мерзлотных почвах склонов преимущественно северо-западной и западной экспозиции; 20 – редкостойные лиственничные с зарослями ерника, голубики и багульника болотного заболоченные леса на таежно-мерзлотных почвах озерных террас; 21 – ерниковые с кедровым стлаником и багульником болотным сфагновые болота на таежно-мерзлотных глееземах заболоченных долин и низких террас; 22 – ерниково-голубичные с сабельником осоково-сфагновые болота на таежно-мерзлотных почвах заболоченных долин; 23 – редкостойные лиственничные с кедровым стлаником и багульником болотным леса на болотных почвах, на аллювиальных отложениях речных долин);

в – воспроизводимость ландшафтно-типологической карты от термодинамических переменных дискриминантным анализом (классификация пикселей по абсолютным значениям разности между предсказанным и исходным номером типа). *Типы термодинамики на уровне обобщенных групп фаций*. С помощью классификации К-средних выделим основные типы термодинамики на уровне обобщенных групп фаций для вегетационного периода. Так как размерность пространства, оцененная методом главных компонент, пять, то оптимальное число классов равно шести. Анализ показывает, что 25 исходных групп фаций объединяются в шесть типов, в значительной степени, на основе величин энтропии и приращения информации. Физиономически группы фаций объединяются в разные термодинамические типы по сомкнутости и видовому составу (хвойные и мелколиственные) древесного яруса (рис. 9). Первый термодинамический тип объединяет группы фаций с разреженными лесами или без древесного яруса (здесь и далее номера типов в подписи к рис. 86: 2, 13, 14, 20, 21, 22) и характеризуется в среднем максимальной энтропией (рис. 10а) и почти минимальным приращением информации (см. рис. 10б). Термодинамически эти группы фаций могут рассматриваться как наиболее равновесные. Классификация упорядочила типы таким образом, что от первого типа к шестому энтропия снижается. Однако изменение приращения информации имеет иной порядок. Минимальное приращение отмечается и в шестом типе — в прибрежных лиственично-кедровых лесах (1, 11), энтропия которого так же минимальна.



**Рис. 9.** Основные типы термодинамики геосистем: *1* – редкостойные лиственничные леса, заболоченные ерники и пляжи; *2* – низкосомкнутые лиственничные, кедрово-лиственничные и сосновые леса; *3* – среднесомкнутые сосновые леса и низкосомкнутые пихтовые и лиственничные леса с кедровым стлаником; *4* – преимущественно вторичные осиновые леса; *5* – сомкнутые кедрово-пихтовые и лиственничные леса; *6* – прибрежные лиственнично-кедровые леса.



**Рис. 10.** Динамика энтропии (а) и приращения информации (б) за вегетационный период для шести термодинамических типов геосистем.

Приращение информации максимально для четвертого типа, включающего в себя в основном вторичные леса (5, 5a, 7a, 8a).

Высокая неравновесность лесов, образованных лиственными породами, в сопоставлении с хвойными типична и для европейской лесной зоны [14]. Третий термодинамический тип, включающий в себя среднесомкнутые леса с кедровым стлаником (4, 8, 12), в среднем так же как первый и шестой тип максимально близок к равновесию при энтропии такой же как у мелколиственных лесов. Второй тип, включающий в себя редкостойные (9, 10, 23) и низкосомкнутые леса (6, 15, 17), характеризуется почти максимальной энтропией и средним уровнем приращения информации. Такое же приращение информации, но при более ОЦЕНКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ

Пата	Π	Относительная влажность воздуха,%		
дата	Переменная	Среднее за 10 дней до съемки	В день наблюдений	
12 июня 2013	Максимум энтропии	67.4	34.6	
20 июля 2015		68.5	56.0	
31 августа 2013		67.6	55.4	
26 июня 2006	Максимум приращения	74.5	63.4	
14 июля 2007	информации	71.5	46.8	
27 июля 2006		56.3	67.1	

Таблица 4. Соотношение максимума энтропии и информации с влажностью воздуха по данным метеостанции

низкой энтропии, характерно и для пятого типа, включающего в себя наиболее сомкнутые леса (7, 16, 18, 19). Таким образом, на рассматриваемой территории реализуются различные соотношения энтропии и приращения информации, что редко наблюдается в Европейской лесной зоне [8, 13, 14].

На рис. 10а и 10б черным тоном выделены те сроки за летний период, в которых максимальны значения энтропии и приращение информации соответственно. Очевидно, что они не совпадают: в год с максимальной энтропией, приращение информации невысокое. Чтобы понять механизмы этого варьирования, сравним изменчивость альбедо в каналах (рис. 11) в срок с высокой энтропией (12 июня 2013 г.) со сроком, где отмечено высокое значение приращения информации (14 июля 2007 г.). Варьирование альбедо в каждом типе различно. Во всех типах в срок с максимальным приращением информации альбедо в дальних инфракрасных каналах (SWIR1, SWIR2) значительно меньше. Эти каналы отражают содержание влаги в растительности (SWIR1) и экосистеме в целом (SWIR2), и чем меньше альбедо, тем больше влаги. Также в этот срок меньше альбедо в видимой части спектра, индицирующих синтез АТФ и соответственно накопление энергии. Уменьшение отражения в этих каналах и приводит к снижению энтропии и увеличению приращения информации и, соответственно, неравновесности системы. Вероятно, изменение рассматриваемых соотношений связано с погодными условиями, а именно с влажностью воздуха [9]. В табл. 4 приведены значения влажности воздуха для различных термодинамических состояний системы. В целом



**Рис. 11.** Сравнение альбедо в шести канала Landsat для сроков съемки с максимально большой энтропией и максимально большим приращением информации (каналы: A1 – голубой, A2 – зеленый, A3 – красный, A4 – ближний инфракрасный, A5 – первый дальний инфракрасный, A7 – второй дальний инфракрасный).

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ № 6 2017

максимуму энтропии соответствует более низкая влажность воздуха или за десять дней или в день измерений, что указывает на очень высокую чувствительность функционирования растительности рассматриваемого региона к режиму увлажнения. Конечно, для того чтобы однозначно доказать эти отношения, необходимо исследовать полные временные серии съемки Landsat в их взаимосвязи с погодой, что выходит за рамки данной работы.

Связь энтропии и приращения информации с влажностью. В целом, чем меньше содержание влаги в системе, тем больше ее энтропия. В отличие от энтропии приращение информации зависит от отражения в ближнем инфракрасном канале (NIR), индицирующем содержание мезофилла. Как следует из рис. 12 существует два типа изменения отражения в этом канале. В типах с относительно большим отражением в SWIR1 (малое содержание влаги в растительности) при уменьшении альбедо отражение в NIR увеличивается, что указывает на увеличение концентрации мезофилла. В вариантах с более низким альбедо в SWIR1 отражение в NIR уменьшается, то есть,



**Рис. 12.** Сравнение эксергии (а) и NDVI (б) для двух крайних термодинамических состояний за вегетационный период.

при исходно более высокой влажности, дальнейшее ее увеличение снижает накопление мезофилла. Эти соотношения приводят к относительной независимости энтропии и приращения информации для всего ряда наблюдений.

На рис. 12 показано изменение эксергии (рис. 12а) и *NDVI* (рис. 12б) в сроки с максимальной энтропией (12 июня 2013 г.) и приращением информации (14 июля 2007 г.). В "сухой" период наблюдений эксергия максимальна, а *NDVI* минимален, а во "влажный" — наоборот. Лишь в шестом прибрежном типе эксергия не зависит от влажности. С эксергией в основном связаны затраты тепла на испарение, а с *NDVI* — биологическая продуктивность. Таким образом получаем, что в условии низкой влажности воздуха (сухой год) система максимизирует затраты энергии на испарение, в ущерб биологической продуктивности, а во влажный год — наоборот.

Обсуждение результатов. Оценить термодинамическую специфику рассматриваемого региона можно на основе сопоставления термодинамических переменных по измерениям со спутника *MODIS TERRA* на северо-западной части Русской равнины [14] и по измерениям с Landsat на юге Валдайской возвышенности [13].

На основе этого сравнения можно утверждать, что энтропия в рассматриваемом регионе летом выше (1.5-1.6 нат по результатам обработки данных спутника MODIS), чем на северо-западе Русской равнины (1.3-1.4 нат). По результатам расчетов по данным измерений Landsat энтропия 1.33 нат на Валдае и 1.5-1.75 на исследуемой территории. Соответственно отличается и прирашение информации. Вместе с тем эксергия и NDVI на Русской равнине и в рассматриваемом регионе практически тождественны. Однако их флюктуации заметно выше. Большая энтропия и меньшее приращение информации в Прибайкалье определяется в первую очередь большим отражением в дальних инфракрасных каналах. Вместе с тем вклад этих каналов в эксергию незначителен, NDVI вообще прямо от них не зависит. Но в целом для региона характерна очень высокая чувствительность практически всех переменных к флюктуации погоды и, по-видимому, прежде всего к увлажнению и очень большой вес энтропии и приращения информации в выделении термодинамических типов геосистем. Можно полагать, что эти параметры могут иметь определенное практическое значение для выделения геосистем с различным масштабом саморегулирования.

Рассмотренный подход интерпретации дистанционной информации дает возможность

количественно оценить термодинамические переменные геосистем. Эксергия солнечной радиации в целом дает оценку затрат тепла на испарение и в среднем увеличивается с ростом фитомассы [9]. Энтропия отражает возможности саморегуляции, а приращение информации, обычно связанное с *NDVI* – неравновесность системы и ее потенциальную биологическую продуктивность. Практически всегда определенное сочетание термодинамических переменных связано со структурой геосистем, определяемой свойствами растительности, почв, и гидротермическим режимом и т.д. В результате эти переменные можно успешно использовать для интерполяции описаний и измерений свойств геосистем на конкретных пробных площадках на всю территорию и строить с известной ошибкой карты типов геосистем.

Заключение. Сравнение варьирования полученных для исследуемой территории термодинамических характеристик с аналогичными оценками для восточно-европейских ландшафтов, показывает что при общей воспроизводимости результата, Прибайкалье безусловно обладает спецификой реакций работы системы на погодные условия. Эта специфика, по-видимому, определяется сложным сочетанием орографии, резко континентальным климатом и влиянием собственно озера Байкал. Климат территории позволил накопить обширный архив сцен Landsat за различные сезоны с 1984 г., что делает возможным, в дальнейшем, детально исследовать связь термодинамических переменных с погодными условиями для длинного ряда наблюдений.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ № 16-35-50035-мол\_нр (сбор и обработка материала), РНФ № 14-27-00065 (анализ материала).

Acknowledgments. This study was carried out with financial support of the Russian Foundation for Basic Research, project no. 16-35-50035-mol\_nr (collection and processing of materials) and project no. 14-27-00065 (analysis of materials).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Байкал (атлас) / Ред. Г.И. Галазий. М.: Изд-во Федеральной службы геодезии и картографии России, 1993. 160 с.
- Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во Ирк. гос. унта, 2009. 291 с.
- 3. Вантеева Ю.В., Солодянкина С.В. Оценка и картографирование продуктивности ландшафтов

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ № 6 2017

Северного Прибайкалья // География и природные ресурсы. 2014. № 3. С. 63–69.

- 4. *Крауклис А.А.* Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 233 с.
- 5. *Моложников В.Н.* Растительные сообщества Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1986. 271 с.
- Природные условия северо-восточного Прибайкалья / Отв. ред. Г.И. Галазий, Л.Н. Тюлина, И.Н. Бейдеман. Новосибирск: Издательство "Наука", 1976. 368 с.
- Пузаченко Ю.Г. Пространственная анизотропность вековой динамики средней глобальной температуры поверхности суши // Изв. РАН. Сер. геогр. 2009. № 5. С. 22–33.
- 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. Термодинамические характеристики южно-таежных биогеоценозов на основе дистанционной информации (юг Валдайской возвышенности, Центрально-лесной заповедник). Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: ФГБУН ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2013. 26 с.
- Солодянкина С.В., Вантеева Ю.В., Истомина Е.А. Картографирование ландшафтов северо-восточного побережья озера Байкал и их устойчивости в условиях развития рекреационной деятельности // Геодезия и картография. 2012. № 12. С. 34–41.
- 11. Jorgensen S.E. and Svirezhev Y.M. Towards a thermodynamic theory for ecological systems. Elsevier: Oxford, 2004. 369 p.
- Puzachenko Y.G., Sandlersky R.B., and Svirejeva-Hopkins A. Estimation of thermodynamic parameters of the biosphere, based on remote sensing // Ecological modelling. 2011. Vol. 222(16). P. 2913–2923.
- Puzachenko Y., Sandlersky R., and Sankovski A. Methods of evaluating thermodynamic properties of landscape cover using multispectral reflected radiation measurements by the Landsat satellite // Entropy. 2013. № 15. P. 3970–3982.
- Puzachenko Y.G., Sandlersky R.B., Krenke A.N., and 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.
- Zhang Y., Yan G., and Bai Y. Sensitivity of topographic correction to the DEM spatial scale // IEEE Geoscience and remote sensing letters. 2015. Vol. 12(1). P. 53–57.

#### REFERENCES

- Bajkal (atlas) [Baikal (atlas)]. G.I. Galazii, Ed. Moscow: Federal Service for Geodesy and Cartography of Russia Publ., 1993. 160 p.
- Berkin N.C., Makarov A.A., Rusinek O.T. *Baikalovedenie*. [Baikal Studies]. Irkutsk: Irkutsk State Univ. Publ., 2009. 291 p.
- Vanteeva Yu.V., Solodyankina S.V. Assessment and Mapping of Landscape Productivity in Northern Cisbaikalia. *Geogr. Prir. Resur.*, 2014, no. 3, pp. 63–69. (In Russ.)
- Krauklis A.A. Problemy eksperimental'nogo landshaftovedeniya [Problems of Experimental Landscape Science]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979. 233 p.
- Molozhnikov V.N., *Rastitel'nye soobshchestva Pribaikal'ya* [Plant Communitiesof the Baikal Region]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986. 272 p.
- Prirodnye usloviya severo-vostochnogo Pribaikal'ya [The Natural Conditions of the North-East Cisbaikalia]. Galazii G.I., Tyulina L.N., Beideman I.N., Eds. Novosibirsk: Nauka Publ., 1976. 368 p.
- Puzachenko Y.G. Spatial anisotropy of secular dynamics of the mean global land surface temperature. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2009, no. 5, pp. 7–22. (In Russ.)
- Sandlersky R.B., Puzachenko Yu. G. Analysis of thermodynamic properties of biogeocenosis based on remote-sensing data. *J. Obshchei. Biol.*, 2009, vol. 70, pp. 121–142. (In Russ.)

- Sandlersky R.B. Thermodynamic parameters of southtaiga biogeocenosis basedon remote-sensingdata (south of Valdai Hills, Central Forest Biosphere Reserve). Extended Abstract of Cand. Sc. (Biology). Moscow: A.N. Severtsov'sInstitute of Ecology and Evolution RAS, 2013. 26 p. (In Russ.)
- Solodyankina S.V., Vanteeva Yu.V., Istomina E.A. Mapping the landscapes of north-eastern coast of Lake Baikal and their sustainability in conditions of recreational activities. *Geodesiya I Kartographiya*, 2012, no. 12, pp. 34–41. (In Russ.)
- Jorgensen S.E., Svirezhev Y.M. Towards a thermodynamic theory for ecological systems. Elsevier, Oxford, 2004. 369 p.
- 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), pp. 2913–2923.
- Puzachenko Y., Sandlersky R., Sankovski A. Methods of evaluating thermodynamic properties of landscape cover using multispectral reflected radiation measurements by the Landsat satellite. *Entropy*, 2013, no. 15, pp. 3970–3982.
- 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, pp. 255–274.
- Zhang Y., Yan G., Bai Y. Sensitivity of topographic correction to the DEM spatial scale. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, vol. 12 (1), pp. 53–57.