

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРНЫХ ЛЕСОВ ПРИХУБСУГУЛЬЯ (ХР. ХОРЬДОЛ-САРЬДАГ, МОНГОЛИЯ)

© 2023 г. Р. Б. Сандлерский*, @, Н. М. Петржик*, Т. Жаргалсайхан**, И. И. Широная*

* Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,
Ленинский проспект, д. 33, Москва, 119071 Россия

** Ботанический сад-институт АНМ, проспект Энхтайван, д. 54а, Улан-Батор, 13330 Монголия

@E-mail: srobert_landy@mail.ru

Поступила в редакцию 07.10.2023 г.

После доработки 10.10.2023 г.

Принята к публикации 10.10.2023 г.

Изложены результаты применения термодинамического подхода для исследования функционирования горных лесных биогеоценозов на основе мультиспектральной сканерной съемки Landsat 8 OLI TIRS для ландшафтов северо-западного Прихубсугулья. На примере участка хр. Хорьдол-Сарьдаг рассмотрено пространственно-временное варьирование термодинамических характеристик, рассчитанных в рамках неравновесной модели термодинамики Тсаллиса. На основе метода главных компонент выделены параметры порядка термодинамической системы – инвариантные состояния каждой переменной. Для каждого инварианта оценен вклад рельефа и выделены ведущие морфометрические характеристики, определяющие его пространственное варьирование. Оценен вертикальный градиент температуры в различные сезоны. Показано, что в условиях резко континентального климата термодинамическая система горных лесов имеет три функциональных подсистемы, отвечающие за испарение, тепловое поле и продуктивность. Рост массы древесной растительности увеличивает поглощение энергии и эвапотранспирацию, но уменьшает неравновесность преобразования солнечной энергии.

Ключевые слова: поглощенная солнечная энергия, эксергия, приращение информации, рельеф, вертикальный градиент температуры, q-индекс

DOI: 10.31857/S1026347023600851, **EDN:** GPNTXA

ВВЕДЕНИЕ

Сложившаяся практика использования мультиспектральной дистанционной информации подразумевает либо дешифрирование природных комплексов на основе коэффициентов спектральной яркости и их сезонной динамики, либо расчет индексов (вегетационные, почвенные, влажностные) через соотношения отражения в различных каналах. В то же время, любая мультиспектральная съемочная система является инструментом для прямого измерения потоков приходящей и отраженной солнечной радиации, что дает возможность количественной оценки составляющих энергетического баланса биогеоценозов: затрат энергии на эвапотранспирацию, потока тепла в атмосферу, затрат на производство биологической продукции и накопление энергии в виде органического вещества. В мировой и отечественной науке эти потоки и регулирующие их процессы, исследуются на гео- и биофизических стационарах, что позволяет верифицировать полученные оценки на реальных объектах, и используя широкий пространственный охват дистанционной информации

с новых позиций исследовать механизмы взаимодействия биогеоценологического покрова и климата. Многообразие мультиспектральных данных позволило решить последнюю задачу на различных уровнях: от локального (Puzachenko *et al.*, 2013) и регионального (Puzachenko *et al.*, 2016a) до глобального (Puzachenko *et al.*, 2011, 2016б), а накопленные за последние 30 лет ряды съемок дали возможность рассмотреть сезонную (Сандлерский, 2012) и многолетнюю (Сандлерский, Пузаченко, 2014) динамику измеряемых параметров.

Энергетические параметры преобразования солнечной энергии (термодинамические переменные), рассчитываемые по мультиспектральной дистанционной информации имеют функциональные связи с измеримыми свойствами биогеоценозов, установленные для различных ландшафтных условий при натуральных исследованиях: южно-таежные ландшафты Тверской области (Sandler'skiy, Krenke, 2020), горно-таежные леса северо-восточного Прибайкалья (Вантеева и др., 2017), степные ландшафты Белгородской области (Sandler'skiy *et al.*, 2010), сезонно-влажные тропиче-

ские леса южного Вьетнама (Sandlerskiy, 2020). Для Центрально-лесного заповедника (ЦЛГЗ) оценен вклад в термодинамические переменные и их устойчивые состояния (параметры порядка/инварианты) морфометрических характеристик рельефа (Сандлерский и др., 2017), погодных и климатических параметров (например, Сандлерский, 2012), возраста и состава растительности (Сандлерский, Пузаченко, 2014). Полученные переменные и их производные в ряде работ использованы как основа для оценки и картографирования свойств ландшафтного покрова (Пузаченко и др., 2014а), ресурсов (Пузаченко и др., 2012), экосистемных услуг и функций (Пузаченко и др., 2014б). Таким образом, разработанная методология анализа мультиспектральных данных дистанционной информации нашла широкое применение не только в научных исследованиях, но и в теории и практике управления природными ресурсами (Желтухин и др., 2011; Пузаченко и др., 2012), лесном хозяйстве (Пузаченко и др., 2014а), мониторинге окружающей среды (Пузаченко и др., 2014в; Сандлерский, 2017; Мерекалова и др., 2023). В работах Б. И. Горного с соавторами отдельные термодинамические переменные, рассчитываемые в рамках этого подхода, используются в качестве индикатора нарушенности и масштаба экологического ущерба экосистем (Горный и др., 2011, 2013, 2019).

В конечном итоге, развитие дистанционных мультиспектральных измерительных систем должно привести к созданию алгоритмов для интеграции значений термодинамических характеристик между различными сроками съемки и различными сенсорами, включая установленные на БПЛА, измерениями наземных спектрометров (Пузаченко и др., 2016), а также данными измерительных комплексов потоков парниковых газов и энергетических потоков Eddy covariance (flux-tower). С другой стороны, развитие предложенного подхода, по-видимому, должно опираться на переход к неэкстенсивной термодинамике Тсаллиса (Tsallis, 2009), подразумевающей нелинейность и скоррелированность взаимодействия элементов системы и, следовательно, потенциальную возможность количественной оценки устойчивости эко- геосистем. Первые такие оценки осуществлены в наших работах для лесных ландшафтов Русской равнины в локальном (Пузаченко и др., 2019) и среднем (Sandlersky *et al.*, 2020) масштабе. Исследования реальных объектов показали, что модель расширенной неаддитивной термодинамики соответствует теоретическим представлениям о работе биогеоценозов, как неравновесных открытых систем, обладающих свойствами самоорганизации и эмерджентности. Таким образом, анализ дистанционной информации на основе информационно-термодинамического подхода позволяет оценить основные особенности про-

странственно-временной динамики биогеоценозов.

В настоящем исследовании рассмотрены термодинамические параметры редких и труднодоступных биогеоценозов – горных лесных ландшафтов северной Монголии, в частности, участок хребта Хорьдол-Сарьдаг, рассчитанные по серии сцен мультиспектральной сканерной съемки Landsat 8 OLI TIRS с пространственным разрешением 30×30 м в период 2013–2021. Резко континентальный климат исследуемой территории способствует регулярности и накоплению дистанционной информации, которая в сочетании с экспедиционными исследованиями, осуществляемыми в рамках работ Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АНМ, создают уникальную возможность для расширения наших представлений о работе растительного покрова. Таким образом, целью настоящего сообщения является выделение специфичных черт преобразования солнечной энергии горными лесными биогеоценозами в условиях резко континентального климата. Использование дистанционной информации позволит сравнить динамику термодинамических переменных в разных регионах и, соответственно, выявить специфичность их функционирования в широком диапазоне ороклиматических условий. Соответственно, основными задачами исследования являются: 1) обобщение пространственно-временного варьирования термодинамических переменных путем выделения инвариантов (параметров порядка); 2) количественная оценка вклада рельефа в параметры порядка, как ключевого фактора дифференциации исследуемой территории; 3) оценка зависимости параметров порядка от собственных свойств биогеоценозов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнена для строго охраняемой территории (СОТ) Хорьдол-Сарьдаг (50.90° с.ш., 99.88° в.д.), расположенной в пределах одноименного хребта, разделяющего котловину озера Хубсугул и Дархадскую котловину (рис. 1а). Данная охраняемая территория входит в комплекс Улаан-Тайга, состоящий из трех ООПТ (входят также СОТ Тенгиз-Шишгед и Улаан-Тайга) и расположена в самом северном аймаке (области) Монголии – Ховсголе. Высоты в пределах исследуемой территории колеблются в пределах от 1600 м (Дархадская котловина) до 3000 м (гора Хуерн Уул). Коренные подстилающие породы представлены в основном известняками кембрийского периода (Мооге *et al.*, 2017). Данная местность подвергалась оледенению по меньшей мере дважды в течение позднего плейстоцена (Почвенный покров..., 1984). Область характеризуется экстремально континентальным климатом с теплым,

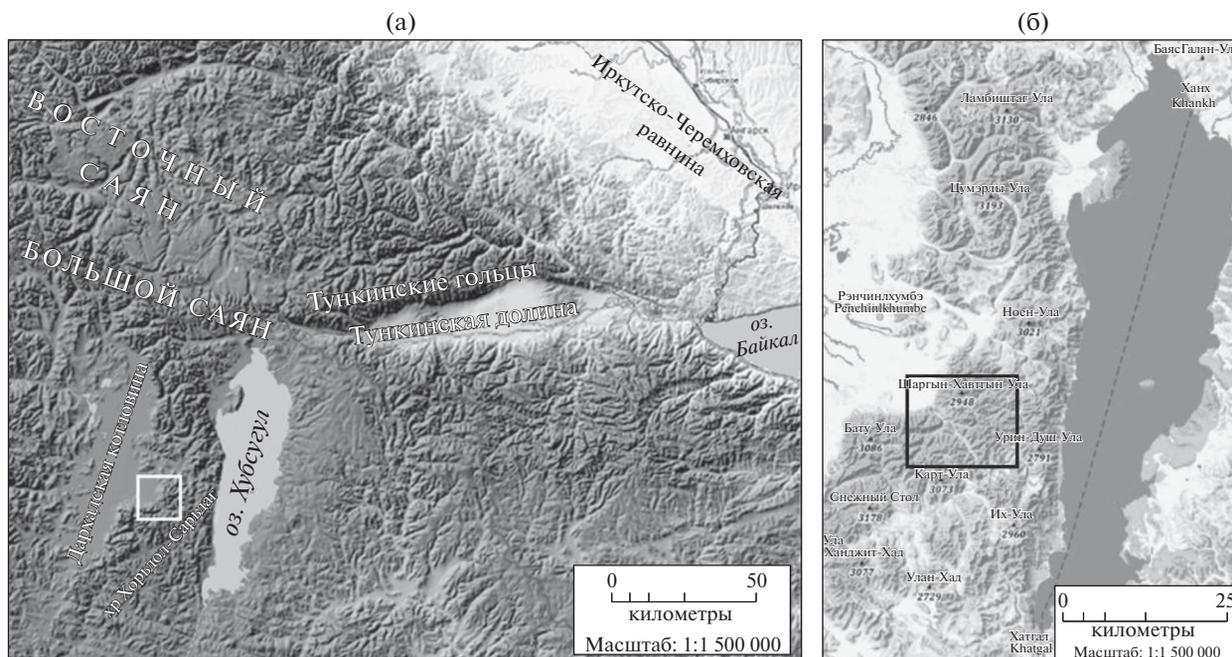


Рис. 1. Географическое положение ключевого участка в мелком (а) и среднем (б) масштабе.

коротким влажным летом и холодной, сухой зимой. Низкая влажность воздуха в весенний период наряду с вымораживанием влаги из верхних горизонтов почв зимой и ветренной погодой в период распада антициклональной области с высоким давлением обуславливает их медленное прогревание (там же). Согласно данным ближайшей метеостанции, расположенной в сомоне Рэнчинлхумбэ (1573 м над ур.м.), в 30 км от участка исследований (рис. 1б) за период с 1975 по 2015 год, среднегодовая температура составляет 6.9°C. Средняя температура января –32.3°C, июля – 13.8°C. Годовое количество осадков равно 263 мм и сильно варьирует от года к году, доходя до 400 мм/год (Энхжаргал, 2020). До 80% осадков поступает в летний период – с июля по август. Территория исследований относится к Прихубсугульскому горно-таежному району (Грубов, 1955). Соответственно, растительные сообщества представляют собой горно-таежные подгольцовые кедровые леса, переходящие в высокогорные луга, в основном на органогенных почвах с многолетнемерзлыми горизонтами. Согласно карте растительности Монгольской республики 1979 года (Карамышева, 1981) для территории характерны “Лиственничные (*Larix sibirica*) и кедрово-лиственничные (*L. sibirica*, *Pinus sibirica*, *Linnaea borealis*, *Vaccinium vitis-idaea*, *V. uliginosum*) горно-таежные леса на мерзлотно-таежных торфянисто-глееватых почвах”.

Термодинамические параметры преобразования солнечной энергии биогеоценозами рассчитывались по мультиспектральной съемке Landsat 8 OLI TIRS с пространственным разрешением 30 × 30 м по 23-м безоблачным сценам, полученным в период 2013–2021 гг. Параметры использованных сцен, в частности, средние значения приходящей солнечной радиации в каналах съемки сенсора, альбедо и температуры деятельной поверхности для исследуемой территории приведены в табл. 1.

Расчет составляющих энергетического баланса поглощенной солнечной энергии и структурно-информационных характеристик, осуществлялся по методике, предложенной Ю.Г. Пузаченко с соавторами (Пузаченко и др., 2019) в рамках модели неэкстенсивной статистической механики Тсаллиса (Tsallis, 1988, 2009). В ее основе лежит оценка энтропии отраженной солнечной радиации и приращения информации по Кульбаку, которые характеризуют неравномерность спектра отраженной солнечной радиации, зафиксированной сенсором съемочной системы, гипотетическому спектру приходящей солнечной радиации.

Классическая статистическая механика базируется на предположении о линейности взаимодействия между элементами термодинамической системы, то есть, смена состояний описывается как

$$\frac{dy}{dx} = a, \text{ при } y = a + x, \text{ и, соответственно, обратное } x = a - y.$$

Таблица 1. Параметры использованных сцен Landsat 8 OLI TIRS

Месяц	Число	Год	День от начала года (DOY)	Приходящая радиация, Вт/м ²	Альбедо	Температура, °С
Январь	4	2018	4	28.19	0.46	-16.1
	12	2015	12	29.86	0.38	-10.1
Февраль	5	2018	36	39.96	0.43	-9.6
	14	2018	45	47.31	0.42	-9.1
	16	2016	47	46.02	0.43	-7.5
	24	2019	55	51.16	0.34	-2.3
Март	10	2021	69	62.47	0.39	2.6
Май	28	2018	148	92.37	0.16	29.6
Июнь	30	2015	181	93.99	0.13	34.6
Июль	13	2014	194	92.63	0.12	34.6
	20	2020	202	90.35	0.11	29.6
Август	28	2019	240	80.92	0.11	28.7
	29	2017	241	78.80	0.11	26.7
Сентябрь	15	2014	258	73.05	0.12	20.2
	22	2020	266	67.38	0.20	17.9
	27	2016	271	64.70	0.15	15.2
Октябрь	11	2015	284	57.14	0.25	13.5
	27	2021	300	47.49	0.40	6.9
Ноябрь	5	2015	309	45.16	0.43	-6.0
	17	2017	321	36.47	0.40	-9.3
Декабрь	6	2018	340	29.65	0.38	-20.3
	24	2013	358	27.39	0.44	-14.6
	30	2021	364	27.58	0.42	-9.9

Неэкстенсивная термостатика подразумевает, что в областях далеких от равновесия, в сложных неста-

ционарных системах их элементы могут взаимодействовать нелинейно, в частности экспоненциально:

$$\frac{dy}{dx} = y, \text{ где } y = e^x, \text{ и, соответственно, обратное } x = \ln y.$$

Константино Тсаллис (Tsallis, 1988) ввел в эти соотношения так называемый параметр деформации, определяющий степень нелиней-

ности взаимодействия между элементами и предложил следующее описание динамики системы:

$$\frac{dy}{dx} = y^q, \text{ где } y = (1 + 1 - q)x)^{\frac{1}{(1-q)}} \equiv e_q^x, \quad e_{q=1}^x = e^x \text{ и, обратное}$$

$$y = \frac{x^{1-q} - 1}{1 - q} \equiv \ln_q x, \quad \ln_1 x = \ln x \text{ при } x > 0.$$

В динамической системе параметр $q = 1 - 1/\rho$, где $\rho > 0$ коэффициент корреляции. То есть, чем больше q превышает единицу, тем больше внутренние корреляции и более организована система. При $q < 1$ система находится в состоянии дезорганизации. Энтропия в заданной таким образом системе – энтропия Тсаллиса – является обобщенным случаем энтропии Больцмана–Гиббса–Шеннона, в котором вместо классического логарифма введен параметрический логарифм Тсаллиса с индексом q , который представляет собой вещественное число:

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

где p_i – вероятность состояния i , $S_q^{\max} = \ln_q n$ – максимум энтропии при $p_i = \frac{1}{n}$, при числе классов n . При этом для $q < 0$ необходимо исключить случаи с отрицательной вероятностью. При $q > 0$ q -энтропия (как и энтропия Больцмана) тем больше, чем меньше разность логарифмов вероятностей соседних энергетических уровней, а при $q < 0$ – наоборот. В результате максимум энтропии, отвечающей условию равновесия достигается при полном доминировании одного энергетического уровня.

Приращение информации Кульбака, оценивающее расстояние между равновесным и неравновесным состояниями в системе Тсаллиса, есть

$$K_q = \sum_{i=1}^k p_i \frac{(p_i^{\text{out}}/p_i^{\text{in}})^{q-1} - 1}{q - 1}.$$

Исходя из общих представлений, как в классической термодинамике Больцмана-Гиббса, так и в неэкстенсивной термодинамике Тсаллиса баланс системы, поглощающей энергию состоит из свободной энергии (потенциал для совершения полезной работы в системе или эксергия), связанной энергии (энергия не способная совершать работу) и приращения внутренней энергии системы:

$$Bq = EXq + STWq + DUq,$$

где Bq – баланс поглощенной энергии, EX – свободная энергия Гиббса/эксергия, $STWq$ – связанная энергия, DUq – внутренняя энергия.

Эксергия солнечной радиации в системе Тсаллиса (EXq) рассчитывается на основе K_q также, как и в модели классической термодинамики:

$$EXq = E^{\text{out}} \left(K_q + \frac{(E^{\text{out}}/E^{\text{in}})^{1-q} - 1}{1 - q} \right),$$

где E^{out} – отраженная солнечная радиация, $E^{\text{out}}/E^{\text{in}}$ – альбедо, $E^{\text{out}} = \sum_{i=1}^k e_i^{\text{out}}$ – сумма отраженной солнечной радиации в каналах, $E^{\text{in}} = \sum_{i=1}^k e_i^{\text{in}}$ – сумма пришедшей радиации в каналах съемки.

Связанная энергия (STW) рассчитывается как

$$STWq = S_q^{\text{out}} TW,$$

S_q^{out} – энтропия отраженной солнечной радиации, TW – тепловой поток от деятельности, зафиксированный сенсором съемочной системы (длинноволновый съемочный канал).

Приращение внутренней энергии рассчитывается как:

$$DUq = Bq - EXq - STWq.$$

Таким образом, для каждого пикселя съемки были рассчитаны следующие переменные: поглощенная и отраженная солнечная энергия, альбедо, эксергия солнечной радиации – затраты энергии на эвапотранспирацию (вт/м^2), связанная энергия – диссипация энергии в атмосферу с тепловым потоком и энтропией (вт/м^2), приращение внутренней энергии – аккумуляция энергии в системе в виде углерода (вт/м^2), приращение информации в системе, преобразующей солнечную энергию (нит), энтропия отраженной солнечной радиации (нит), q -индекс. Также был рассчитан стандартный индекс, характеризующий биологическую продуктивность растительности – $NDVI$.

Анализ пространственно-временного варьирования термодинамических переменных осуществлялся на основе представлений об инвариантах или параметрах порядка, согласно которым состояние системы описывается ограниченным числом факторов. Концепция параметров порядка, предложенная в синергетике Германом Хакеном в 1980 году (Хакен, 1980), получила свое развитие в его работе 2001 года “Принципы работы головного мозга” (Хакен, 2001), в которой было обосновано использование для выделения параметров порядка методом главных компонент. Ю.Г. Пузаченко в 2010 г. продемонстрировал тождественность понятия “параметр порядка” понятию “ландшафтный инвариант” по В.Б. Соchau (1978). В дальнейшем методология выделения инвариантов по сериям мультиспектральной съемки, как в виде термодинамических переменных, так и в виде исходных значений отражения в каналах, многократно использовалась для выделения устойчивых во времени пространственных структур термодинамической системы или системы отражения (Сандлерский, 2012; Пузаченко и др., 2019; Байбар и др., 2023). Пространственно-временное варьирование переменных обобщалось методом главных компонент (PCA, varimax normalization) для каждой переменной за 23 срока от-

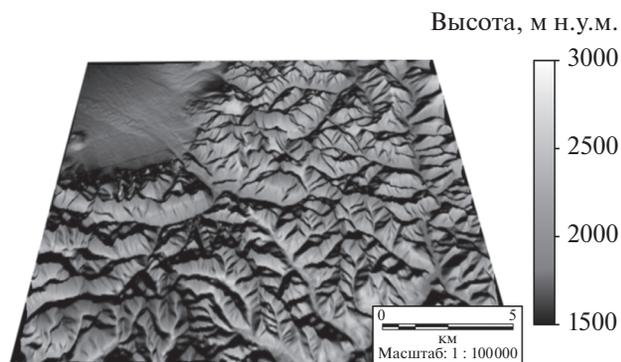


Рис. 2. Цифровая модель рельефа ключевого участка.

дельно, и далее исходя из полученной факторной структуры обобщались в сезонные инварианты термодинамической системы.

Согласно теории, варьирование параметров порядка термодинамической системы в свою очередь определяется так называемыми управляющими параметрами – внешними факторами, под которыми обычно подразумеваются климат, погода, рельеф и состояние растительного покрова. В настоящей работе в качестве управляющих параметров рассмотрены морфометрические характеристики рельефа на различных иерархических уровнях организации и некоторые свойства растительности, полученные в ходе полевых исследований. Иерархические уровни выделялись на основе спектрального анализа цифровой модели рельефа открытого доступа SRTM (USGS EROS Archive..., 2018) с пространственным разрешением 30×30 м (рис. 2) по методике, предложенной Ю.Г. Пузаченко с соавторами (2002). Были выделены иерархические уровни с линейными размерами структур: 150, 570, 1110, 1380, 1890, 3030 м. Для каждого из этих уровней были рассчитаны стандартные морфометрические характеристики, отражающие перераспределение тепла влаги рельефом: крутизна, аспект, освещенность с юга/востока, максимальная кривизна, минимальная кривизна, профильная выпуклость, плановая выпуклость, продольная выпуклость, поперечная выпуклость. Влияние рельефа на преобразование энергии оценивалось с помощью множественной регрессии полученных инвариантов от морфометрических характеристик. Полевые измерения свойств биогеноценозов (комплексные описания почвы и растительности, измерения сумм площадей сечений древостоя и индекса листовой поверхности (leaf area index, LAI) осуществлялись на трансекте длиной 1100 м (с шагом опробования 20 м), заложенном вдоль крутого склона южной экспозиции от 2000 до 2380 м над ур. м. (рис. 3). Трансект в основной своей части проходит через кедровый среднесомкнутый лес (2000–2200 м над ур. м.) и в верхней части склона (2200–2350 м над ур. м.) пе-

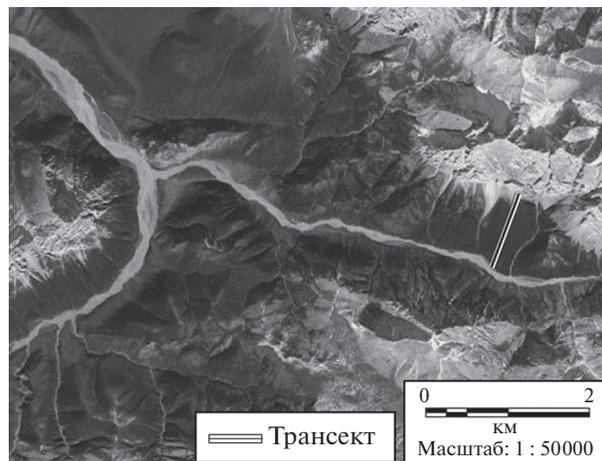


Рис. 3. Положение трансекта с регулярным шагом опробования на фрагменте снимка (Google Maps).

ресекает участок осоково-разнотравно-злаковой пустоши и заканчивается на каменной осыпи.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4а приведен сезонный ход приходящей и поглощенной солнечной энергии, а также составляющих энергетического баланса. В целом баланс и его составляющие соответствуют сезонному ходу приходящей радиации. Таким же образом ведет себя температура деятельной поверхности (табл. 1). На рис. 4б приведен сезонный ход структурно-информационных характеристик, который демонстрирует тот факт, что период активной работы растительного покрова составляет всего порядка ста дней, с начала июня по середину сентября. Индексы, отражающие неравновесность преобразования солнечной энергии, демонстрируют тот факт, что период активной работы растительного покрова начинается в конце мая и заканчивается в конце сентября. Четким количественным показателем, индицирующим сезонные начало и окончание работы биогеноценоза можно считать переход значения q -параметра через 1 (рис. 4б).

Метод главных компонент позволил выделить для каждой термодинамической переменной три инвариантных состояния, отражающих зимнее (ноябрь–март), летнее (июнь–сентябрь) и переходное (апрель и октябрь) состояния. Для температурного поля переходного состояния не выделяется. В табл. 2 приведены доли (в процентах) варьирования, описываемого факторами метода главных компонент для поглощенной солнечной энергии и составляющих ее баланса. Естественно, что распределение описываемой доли варьирования между факторами зависит от количества сцен для того или иного сезона. Для всех переменных, кроме связанной энергии, основная доля описываемого инвариантами варьирования

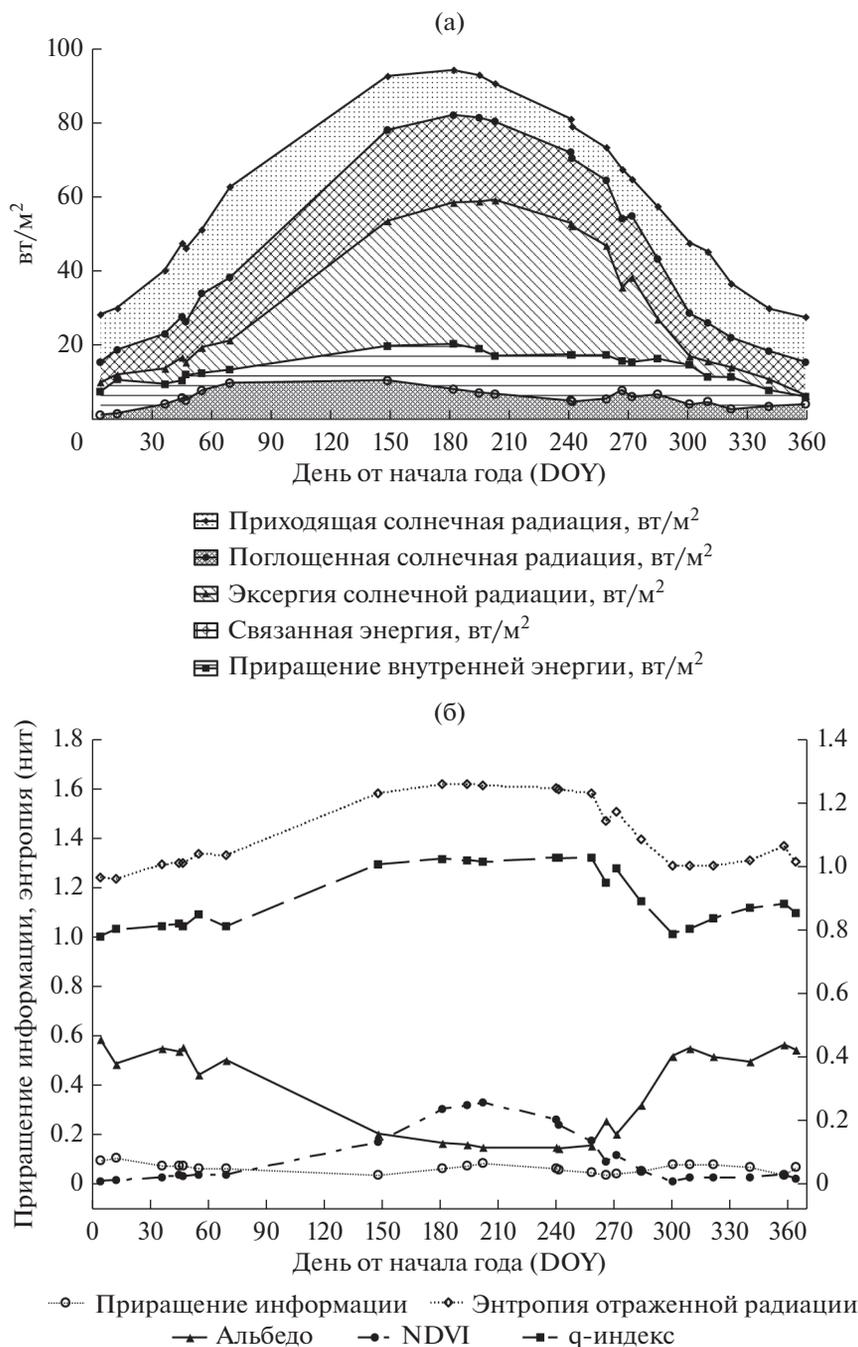


Рис. 4. Сезонный ход термодинамических переменных (средние значения для территории): а – приходящая энергия, поглощенная энергия и составляющие ее баланса, б – структурно-информационные характеристики.

переменных (65–70%) приходится на холодный (зимний) период. Летний инвариант описывает 13–16%, инвариант переходного периода – 5–6%. Для приращения внутренней энергии картина несколько иная: зимний инвариант определяет 54% варьирования, а летний – 25%. В целом же три сезонных параметра порядка описывают порядка 85–90% варьирования составляющих баланса поглощенной солнечной радиации.

Доли, описываемого инвариантами варьирования для информационных индексов, индекса продуктивности и температуры приведены в табл. 3. В целом, распределение долей описываемого компонентами варьирования переменных сходно с составляющими баланса поглощенной радиации. При этом для приращения информации и q-индекса доля варьирования, описываемая летним инвариантом значительно выше, чем для остальных

Таблица 2. Доли описания сезонными инвариантами поглощенной солнечной энергии и ее составляющих

Инвариант	Поглощенная энергия	Составляющие баланса		
		эксергия	связанная энергия	приращение внутренней энергии
Зимний (октябрь—март)	67.39	65.29	70.65	54.07
Летний (июнь—сентябрь)	13.78	16.71	13.73	25.52
Переходный (март, сентябрь)	5.88	5.37	5.59	4.80
В целом	87.05	87.37	89.97	84.39

Таблица 3. Доли описания сезонными инвариантами структурно-информационных характеристик и температуры

Инвариант	Приращение информации	Энтропия	q-индекс	NDVI	Температура
Зимний (октябрь—март)	50.43	64.28	40.65	69.87	67.10
Летний (июнь—сентябрь)	25.35	15.65	22.10	16.59	17.66
Переходный (март, сентябрь)	7.62	5.69	9.00	5.42	—
В целом	83.40	85.62	71.75	91.88	84.76

переменных — 25 и 22%. Также доля описываемого тремя инвариантами варьирования информационно-термодинамических характеристик, в среднем несколько ниже, чем для составляющих баланса.

Для выделения функциональных подсистем термодинамической системы исследуемой территории мы подвергли анализу методом главных компонент сразу все переменные за вегетационный сезон (конец мая—конец сентября). Анализ показал, что выделяются три подсистемы: “поглощенная энергия и затраты энергии на эвапотранспирацию”, “температура, связанная энергия и энтропия” и “структурно-продукционная” (приращение информации, q-индекс и NDVI). Аналогичная картина наблюдается при обобщении летних инвариантов для каждой переменной: получены те же три параметра порядка термодинамической системы.

В зимний период растительный покров минимально активен, поэтому влияние рельефа рассматривалось только для летних инвариантов термодинамических переменных. В табл. 4 обобщены результаты регрессионных моделей инвариантов от морфометрических характеристик. Для альбедо, поглощенной солнечной радиации и составляющих ее баланса уровень детерминации составляет 30–40% и наиболее высок он для эксергии ($R^2 = 0.48$), приращения внутренней энергии ($R^2 = 0.51$) и температуры деятельной поверхности ($R^2 = 0.63$). Вклад рельефа в пространственное варьирование энтропии отраженной солнечной радиации практически отсутствует ($R^2 = 0.1$). Основной вклад рельеф вносит на мезоуровне с линейными размерами структур 570–1380 м, что, в целом соот-

ветствует средней длине склона. Затраты на эвапотранспирацию и производство биологической продукции максимальны на вогнутых низких позициях, а рассеяние тепловой энергии в атмосферу — на выпуклых и высоких. С ростом освещенности растет прежде всего связанная энергия (рассеяние энергии в атмосферу).

Наличие цифровой модели рельефа и серии измерений температуры в тепловом канале позволяет напрямую оценить вертикальный градиент температуры. На рис. 5 приведены типичные сезонные зависимости температуры от высоты для конкретных сроков. Зимой температура с высотой достаточно равномерно возрастает (5а), а поздней весной — равномерно падает (5б). Летом — падает, но более полого чем весной (5в) и, во второй половине осени (5г) относительно не связаны. На рис. 6 приведен сезонный ход вертикального градиента ($^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$): летом он близок к 0, весной и осенью — близок к стандартным значениям (1.1 в конце мая и 0.8 во второй половине сентября). В целом полученные оценки и сезонный ход вертикального градиента вполне сопоставим с оценками, полученными путем сопоставления метеорологических данных для сходных климатических условий (Гордеев, 2011).

В табл. 5 приведены коэффициенты корреляции (r) между летними инвариантами термодинамических характеристик и отдельными свойствами растительного и почвенного покрова, измеренными на трансекте (даны только характеристики с наиболее высокими и значимыми связями). Масса растительности (в первую очередь древесной, выраженной через сумму площадей сечений древостоя

Таблица 4. Вклад морфометрических характеристик рельефа в описание летних инвариантов термодинамических переменных (R^2 – коэффициент детерминации множественной регрессии, в ячейках – знак влияния и линейные размеры иерархических уровней)

Переменная	R^2	Высота (знак влияния)	Крутизна	Кривизна		Освещенность	
				мин	макс	юг	восток
Альbedo	0.33	+	570, –1890	– 570		1110	
Поглощенная энергия	0.31	–		570			
Эксергия	0.48	–			570		
Связанная энергия	0.33				–570, –1380	570	1380
Приращение внутренней энергии	0.51	+	– 1890				150
Температура	0.63	–	1110			1110	
NDVI	0.37	–			–1110	570	
Приращение информации	0.30	–	570, –1890			150	
Энтропия	0.09				–570	570	1890
q-индекс	0.31	+	150		570	–570	

(BSA), индекс листовой поверхности (LAI), сомкнутость древостоя и фитомассу), увеличивает поглощение солнечной энергии, затраты на эвапотранспирацию и соответственно уменьшают связанную энергию и приращение внутренней энергии. С продуктивностью (NDVI) связан только индекс листовой поверхности (чем выше LAI, тем выше NDVI). В то же время, масса древесной растительности увеличивает приращение информации и уменьшает энтропию и q-индекс. Температура деятельной поверхности связана отрицательно с проективным покрытием мохово-лишайникового яруса и, в меньшей степени, с сомкнутостью и фитомассой. С ростом водородного показателя растет поглощение, затраты на испарение, NDVI, и, соответственно, уменьшаются связанная энергия и приращение внутренней энергии, энтропия и q-индекс. Влияние мощности органогенного горизонта в целом не велико ($r = 0.3$) и сходно с влиянием суммы площадей сечений и листового индекса.

ОБСУЖДЕНИЕ

Специфика преобразования солнечной энергии в горных биогеоценозах была рассмотрена в рамках термодинамического подхода в работе Ю.В. Вантеевой, Ю.Г. Пузаченко и Р.Б. Сандлерского (2017) для северо-восточного Прибайкалья. Прихубсугулье и Прибайкалье имеют сходный резко континентальный климат, но во втором случае влияние Байкала существенно его смягчает, увеличивая количество зимних осадков. Раститель-

ный покров двух ключевых участков несколько различается. Во-первых, пространственный охват в Прибайкалье меньше, во-вторых, амплитуды высот: для Прибайкалья – 480–1240 м над ур. м., для Прихубсугулья – 1600–3000 м над ур. м. Также стоит отметить, что расчеты для Прибайкалья осуществлялись в рамках модели классической термодинамики, без оценки q-индекса. Впрочем, сравнение термодинамических характеристик, рассчитанных в рамках классической и неэкстенсивной (Тсаллисовской) моделей по одним и тем же сценкам для различных территорий (ЦЛГЗ и данный участок), показало, что соотношения между переменными и их пространственно-временное варьирование принципиально не меняются. Различия между ними конечно существуют, что было показано в нашей работе по Центрально-лесному заповеднику (Пузаченко и др., 2019), но представляют собой предмет отдельного исследования на обширном полевом материале, которым для Прихубсугулья мы пока не располагаем (но располагаем для ЦЛГЗ).

В целом, пространственно-временное варьирование составляющих энергетического баланса и отношения между его составляющими подобно для всех территорий, включая и южно-таежные биогеоценозы ЦЛГЗ. Сезонный ход составляющих баланса подчиняется сезонному ходу приходящей солнечной радиации (рис. 4а). Однако взаимоотношения между структурно-информационными характеристиками в существенной степени различаются. Для южно-таежных биогеоценозов характерна прямая обратная зависимость между энтропией

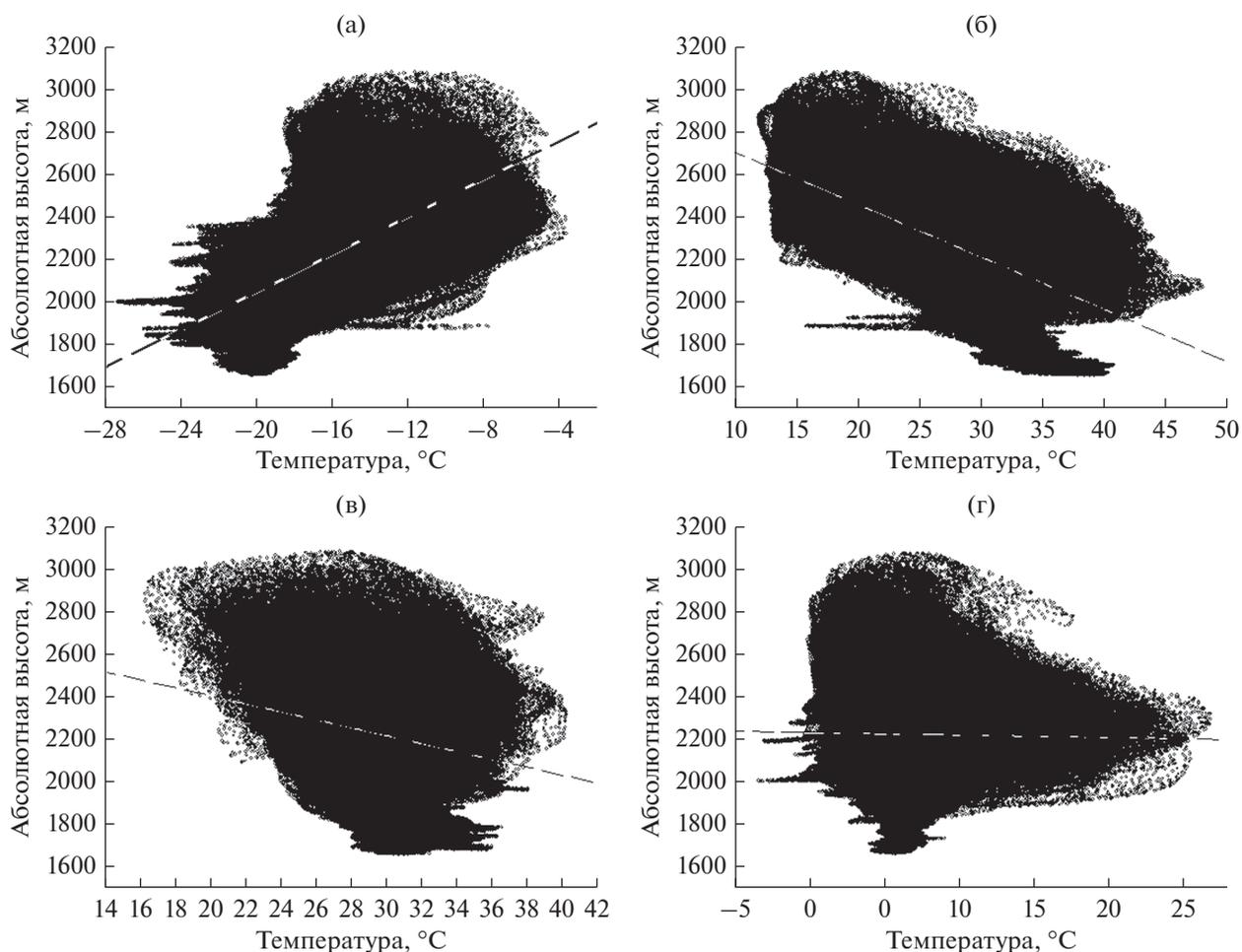


Рис. 5. Зависимость температуры деятельной поверхности от абсолютной высоты по цифровой модели рельефа: а – 04.01.2018, б – 28.05.2018, в – 20.07.2020, г – 27.10.2021.

отраженной солнечной радиации и приращением информации по Кульбаку и тесная положительная связь последнего с индексом биологической продуктивности NDVI, а для горно-таежных биогеоценозов такой жесткой связи не наблюдается. Сравнение летних параметров порядка для этих трех типов также демонстрирует различия в их работе. Так, для ЦЛГЗ и Прибайкалья выделяются две подсистемы: “тепловое рассеяние – испарение” и “неравновесность – продуктивность”, а для Прихубсугулья три: “испарение”, “неравновесность – продуктивность” и “тепловое рассеяние”. Таким образом можно утверждать, что температурный режим Прихубсугулья в значительно меньшей степени определяется приходом солнечной радиации, чем для остальных сообществ, а в большей степени господствующей воздушной массой. Эту гипотезу подтверждает сравнение вклада рельефа в инвариант летнего теплового поля для Прихубсугулья и Прибайкалья, которое показало их тождественность, то есть, в обоих случаях коэффициент детерминации составил

0.63. Для оценки влияния теплового режима на преобразование солнечной радиации в 2022 г. на различных участках трансекта нами были заложены пять термолоттеров. Результаты их работы будут получены в 2024 г. Очевидно, что влажность воздуха и количество осадков так же играют важную роль в преобразовании солнечной энергии, однако для оценки их долговременной динамики инструментальными возможностями мы пока не располагаем.

Зависимость термодинамических переменных от свойств растительности Прихубсугулья (табл. 5) в целом соответствует закономерностям, наблюдаемым на других территориях: рост массы древесной растительности увеличивает затраты энергии на эвапотранспирацию, но, как ни странно, практически не влияет на температуру деятельной поверхности. В то же время приращение информации и продуктивность для равнинных ландшафтов обычно уменьшаются с запасом древесины. В рассматриваемом же случае происходит обратное. Отрицательная связь q-индекса с массой

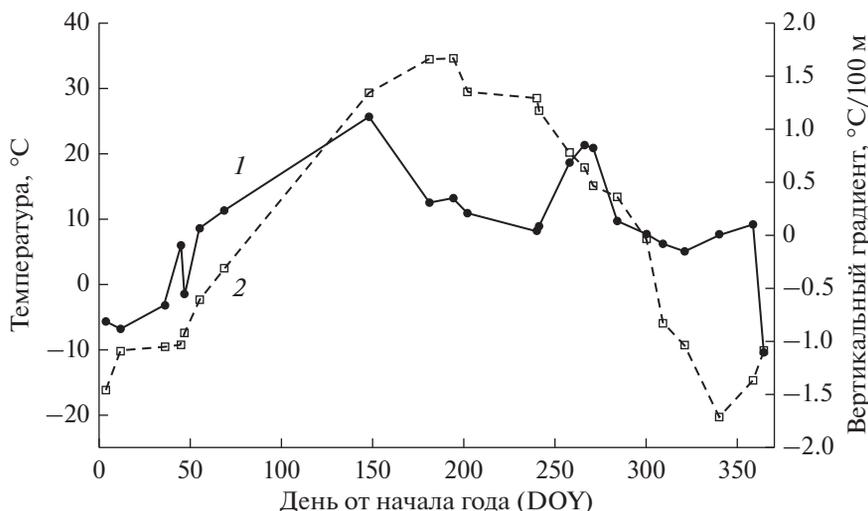


Рис. 6. Сезонный ход вертикального градиента температур: 1 – градиент, 2 – средняя температура для сцены.

древесной растительности в целом соответствует отношениям, наблюдаемым для южно-таежного ландшафта, где он максимален на лугах и минимален в старых еловых лесах (Пузаченко и др., 2019). Учитывая, что при анализе факторной структуры (выделении летних параметров порядка на основе инвариантов всех переменных), q -индекс, приращение информации и индекс продуктивности определяются одним параметром порядка, который противопоставляет NDVI и приращение информации q -индексу, возможно все они описы-

вают различные механизмы реакции растительности на изменение погодных условий.

Таким образом анализ пространственно-временного варьирования термодинамических переменных позволяет сделать следующие выводы: 1) термодинамическая система в целом может находиться в трех принципиально устойчивых состояниях – летнем, зимнем и переходном; 2) в системе действуют три функциональные подсистемы: “испарение”, “неравновесность – продуктивность” и “тепловое рассеяние”, в отличие от ис-

Таблица 5. Коэффициенты корреляции (r) между летними инвариантами термодинамических характеристик и основными свойствами биогеоценозов, измеренными на трансекте с шагом 20 м (54 точки). BSA – сумма площадей сечений древостоя, LAI – индекс листовой поверхности (leaf area index)

Переменная	BSA	LAI	Сомкнутость древостоя	Сухая фитомасса	Проективное покрытие мохово-лишайникового яруса	pH	Мощность органогенного горизонта
Альбедо	-0.81	-0.49	-0.72	-0.44	-0.13	-0.48	-0.30
Поглощенная энергия	0.83	0.50	0.72	0.42	0.11	0.49	0.30
Эксергия	0.85	0.51	0.73	0.39	0.08	0.50	0.31
Связанная энергия	-0.85	-0.48	-0.67	0.05	0.32	-0.56	-0.18
Приращение внутренней энергии	-0.85	-0.47	-0.76	-0.37	-0.15	-0.51	-0.33
Температура	0.07	0.26	-0.28	-0.32	-0.59	0.25	-0.28
NDVI	0.18	0.50	0.08	0.22	0.20	0.41	0.03
Приращение информации	0.81	0.63	0.53	0.06	-0.20	0.59	0.16
Энтропия	-0.79	-0.29	-0.78	-0.09	0.07	-0.51	-0.28
q -индекс	-0.85	-0.61	-0.64	-0.11	0.11	-0.58	-0.21

следованных нами ранее регионов; 3) уровень детерминации рельефом термодинамических параметров составляет 30–40% и основной вклад рельеф вносит на мезоуровне; 4) в летний период продуктивность увеличивается с ростом индекса листовой поверхности, а в переходные периоды — с ростом суммы площадей сечений древостоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на общую воспроизводимость по сравнению с нашими предыдущими исследованиями, применение методики расчета термодинамических характеристик для резко континентального климата продемонстрировало специфику работы горных биогеоценозов Прихубсугулья. По-видимому, они обусловлены тремя факторами: погодными условиями, орографией и собственно климатом. Последний позволил накопить длинный ряд безоблачных сцен Landsat 4.5 и 7 за период с 1986 по 2011 год (62 сцены), что дает нам возможность в дальнейшем не только попытаться оценить долговременную динамику переменных, но и попытаться на основе данных ближайшей метеостанции подробно исследовать зависимость термодинамических переменных от погоды. Информация с термодатчиков поможет нам оценить, насколько данные метеостанции, расположенной в котловине, соотносятся с варьированием температуры по склону. Для равнинных южно-таежных ландшафтов показано (Пузаченко и др., 2019), что измерения температуры со спутника хорошо коррелируют с данными по метеостанции.

Поскольку в конечном итоге “определенное сочетание термодинамических переменных связано со структурой геосистем, определяемой свойствами растительности, почв и гидротермическим режимом” (Вантеева и др., 2017, стр. 115). Применение информационно-термодинамического подхода для оценки работы биогеоценологического покрова как сложной самоорганизующейся системы в различных ландшафтно-климатических условиях позволит нам в единой системе оценить особенности их функционирования. В этой связи именно исследование ландшафтов Монголии как достаточно репрезентативного региона для Центральной Азии представляется нам весьма информативным как с методической, так и с практической точки зрения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллективу Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АНМ, Зоёо Дамдинжав (Ботанический сад-институт ботаники АНМ), Ксении Ермохиной (ИПЭЭ РАН) за помощь в сборе полевого материала.

Работа выполнена при поддержке РНФ № 22-27-00781.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Байбар С., Пузаченко М.Ю., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н.* Ландшафтные инварианты — параметры порядка динамической системы // Изв. РАН Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 3. С. 370–390.
<https://doi.org/10.31857/S2587556623030056>
- Вантеева Ю.В., Пузаченко Ю.Г., Сандлерский Р.Б.* Оценка термодинамических переменных геосистем северо-восточного Прибайкалья на основе мультиспектральной дистанционной информации // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 6. С. 157–174.
<https://doi.org/10.7868/S0373244417060093>
- Герасимов И.П., Лавренко Е.М.* Основные черты природы Монгольской народной республики // Изв. АН СССР. Сер. Геогр. 1952. № 1. С. 27–48.
- Гордеев И.Н.* Вертикальные градиенты температуры воздуха в бассейне Саяно-Шушенского водохранилища // Вестн. Том. гос. ун-та. 2011. № 346. С. 181–184.
- Горный Б.И., Киселев А.Б., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А.* Термодинамический подход к спутниковому картированию накопленного экологического ущерба лесных экосистем // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 124–136.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-4-124-136>
- Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш.* Термодинамический подход для дистанционного картографирования нарушения экосистем // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194.
- Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Храмов В.Н.* Верификация крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушения экосистем // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 201–212.
- Грубов В.И.* Конспект флоры Монгольской Народной Республики // Тр. монгольской комиссии. Вып. 67. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 308 с.
- Желтухин А.С., Котлов И.П., Кренке А.С., Пузаченко Ю.Г., Сандлерский Р.Б.* Информационное обеспечение устойчивого регионального развития на основе заповедников (опыт Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника) // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2011. Т. 13. № 1(6). С. 1508–1516.
- Карамышева З.В.* Карта растительности монгольской народной республики // Геобот. картогр. 1981. 3–22.
<https://doi.org/10.31111/geobotmap/1981.3>
- Мерекалова К.А., Харитонов Т.И., Сандлерский Р.Б., Дьяконов К.Н.* Изменение экосистемных функций и их взаимоотношений при развитии постмелиоративного ландшафта Мещёрской низменности // Феномен ландшафтно-географического исследования / Отв. ред. Д.В. Черных. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2023. С. 30–41.
https://doi.org/10.53954/9785604788929_30

- Мурзаев Э.М.* Монгольская Народная Республика: физико-географическое описание. М.: Географгиз, 1952. 472 с.
- Почвенный покров и почвы Монголии / Ред. И.П. Герасимов, Н.А. Ногина. М.: Наука, 1984. 191 с.
- Пузаченко Ю.Г.* Инварианты динамической геосистемы // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 6–16.
- Пузаченко Ю.Г.* Ранговые распределения в экологии и неэкстенсивная статистическая механика // Аспекты биоразнообразия: Сб. тр. Зоологического музея МГУ. Т. 54(1). Ч. 1. М.: Т-во научных изданий КМК, 2016. С. 42–71.
- Пузаченко Ю.Г., Байбар А.С., Варлагин А.В., Кренке А.Н., Сандлерский Р.Б.* Тепловое поле южно-таежного ландшафта Русской равнины // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 2. С. 51–68.
- Пузаченко Ю.Г., Котлов И.П., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю.* Оценка состояния возобновимых природных ресурсов и окружающей среды на основе дистанционной информации // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2012. № 3(123). С. 55–59.
- Пузаченко Ю.Г., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю., Сандлерский Р.Б., Широия И.И.* Оценка термодинамических параметров ландшафтного покрова по мультиспектральным измерениям отраженной солнечной радиации Landsat на основе неэкстенсивной статистической механики // Докл. Акад. наук. 2019. Т. 487(3). С. 310–316. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524873310-316>
- Пузаченко Ю.Г., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю.* Мультиспектральная дистанционная информация в исследовании лесов // Лесоведение. 2014. № 5. С. 13–29.
- Пузаченко Ю.Г., Сандлерский Р.Б., Санковский А.Г., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю.* Оценка потенциала обеспечивающих, поддерживающих и регулирующих экосистемных услуг с использованием мультиспектральной дистанционной информации (глобальный и региональный уровни) // Учет и оценка экосистемных услуг (ЭУ) – Опыт, особенно Германии и России / сост. К. Груневальд, О. Бастиан, А. Дроздов, В. Грабовский. Dresden: Bundesamt für Naturschutz, 2014. С. 118–134 (русс./англ.).
- Пузаченко Ю.Г., Сандлерский Р.Б., Широия И.И.* Долговременные мультиспектральные измерения растительных сообществ // Стационарные экологические исследования: Опыт, цели, методология, проблемы организации / Материалы всероссийского совещания. ЦЛГПБЗ. 15–19 августа 2016. М.: Т-во научных изданий КМК, 2016. С. 144–149.
- Сандлерский Р.Б.* Динамика термодинамических характеристик ландшафта Центрально-Лесного заповедника в зависимости от погодных условий // Динамика многолетних процессов в экосистемах Центрально-лесного заповедника / Ред. А.С. Желтухин / Труды Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. Вып. 6. Великие Луки: Великолукская городская типография, 2012. С. 40–55.
- Сандлерский Р.Б.* Многомерный анализ термодинамических переменных южнотаежных биогеоценозов по данным дистанционного зондирования // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 1(5). С. 1363–1366.
- Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю.* Мультиспектральная информация в исследовании энергетического баланса биогеоценозов // Биогеоценология в XXI веке: идеи и технологии. XXIV чтения памяти академика В.Н. Сукачева / Ред. Ю.А. Курбатова. М.: Т-во научных изданий КМК, 2017. С. 181–209.
- Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г.* Термодинамика ландшафта на основе данных дистанционного зондирования // Горизонты ландшафтоведения / Ред. К.Н. Дьяконов, В.М. Котляков / Вопр. геогр. № 138. М.: Кодекс, 2014. С. 185–214.
- Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
- Хакен Г.* Синергетика. М.: МИР, 1980. 405 с.
- Хакен Г.* Принципы работы голоногого мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: ПерСЕ, 2001. 351 с.
- Энхжаргал Э.* Дополнение к флоре печеночных мхов хребта Хорьдол-Сарьдаг (Северная Монголия) // Пробл. Бот. Юж. Сибири и Монголии. 2020. Т. 19(1). С. 208–212.
- Moore P.E., Meyer J.B., Chow L.S.* Natural resource inventory and monitoring for Ulaan Taiga Specially protected areas – An assessment of needs and opportunities in northern Mongolia // U.S. Geological Survey Open-File Report 2017–1025. 2017. 35 p. <https://doi.org/10.3133/ofr20171025>
- 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. V. 15. P. 3970–3982. <https://doi.org/10.3390/e15093970>
- 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 // Ecol. Model. 2016. V. 319. P. 255–274. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.046>
- Puzachenko Y.G., Sandlersky R.B., Sankovski A.G.* Analysis of spatial and temporal organization of biosphere using solar reflectance data from MODIS satellite // Ecol. Model. 2016. V. 341. P. 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.09.022>
- Puzachenko Y.G., Sandlersky R.B., Svirejeva-Hopkins A.* Estimation of thermodynamic parameters of the biosphere, based on remote sensing // Ecol. Model. 2011. V. 222(16). P. 2913–2923. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.05.011>
- Sandlerskiy R., Puzachenko Y.* Dynamic of landscape energetic characteristics based on remote sensing data // The probl. of Landscape Ecol. 2011. V. 30. P. 125–132.
- Sandlerskiy R.B., Stefanov S.V., Puzachenko Y.G., Puzachenko M.Y.* Multifunctional landscape assessment // Implementation of landscape ecological knowledge in practice / The 1-st EALE-Europe thematic symposium proceedings. Poznan, June 16-19.06.2010. Poznan: Wydawnictwo Naukowe UAM, 2010. P. 178–182.

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. V. 26. P. 111–118.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-31185-8_7

Tsallis C. Introduction to nonextensive statistical mechanics. N.Y.: Springer, 2009. 382 p.

Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics // J. Stat. Phys. V. 52. 1988. P. 479–487.

USGS EROS Archive – Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled / Earth resources observation and science (EROS) center. 2018 https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-void?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects [01.10.2023].

Thermodynamical Parametr of Khubsugul Mountain Forests (Khordol-Sardag, Mongolia)

R. B. Sandlerskiy^{1, #}, N. M. Petrzhek¹, T. Jargalsaikhan², and I. I. Shironiya¹

¹*Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Leninskiy prospect, 33, Moscow, 119071 Russia*

²*Botanic Garden and Research Institute MAS, Peace av., 54a, Ulaanbaatar, 13330 Mongolia*

[#]*e-mail: srobert_landy@mail.ru*

Presented results of using a thermodynamic approach to study the functioning of mountain forest biogeocenoses based on Landsat 8 OLI TIRS multispectral scanner survey for the landscapes of the northwestern Khubsugul region. Using the example of a section of the ridge. Khordol-Sardag considers the spatiotemporal variation of thermodynamic characteristics calculated within the framework of the nonequilibrium Tsallis thermodynamics model. The order parameters of the thermodynamic system (invariant states) are identified based on the principal component method. For each invariant, we assessed the contribution of relief and the leading morphometric characteristics that determine its spatial variation identified. The vertical temperature gradient in different seasons estimated. Shown that in conditions of a sharply continental climate, the thermodynamic system of mountain forests has three functional subsystems responsible for evaporation, thermal field and productivity. Shown that an increase in the mass of woody vegetation increases energy absorption and evapotranspiration, but reduces the disequilibrium of solar energy conversion.

Keywords: absorbed solar energy, exergy, information increment, relief, vertical temperature gradient, q-index