

DOI:10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-299-302

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ГОРНЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИХУБСУГУЛЬЯ (СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ) ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ORGANIZATION OF MOUNTAIN FOREST ECOSYSTEMS IN THE KHUBSUGUL REGION (NORTHERN MONGOLIA) BASED ON REMOTE SENSING DATA

Петржиж Н.М.¹, Сандлерский Р.Б.¹, Жаргалсайхан Т.², Дамдинжав З.², Ермохина К.А.¹

Petrzhik N.M.¹, Sandlerkiy R.B.¹, Jargalsaikhan T.², Damdinjav Z.², Ermokhina K.A.¹

e-mail: petrzhik.nat@mail.ru

¹Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

²Ботанический сад-институт АНМ, Улан-Батор, Монголия

¹A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Moscow, Russia

²Botanic garden and Research Institute, MAS, Ulaanbaatar, Mongolia

Аннотация. На основе метода главных компонент обобщено пространственно-временное варьирование энергетических характеристик горных лесных экосистем хребта Хорьдол-Сарьдаг (Северная Монголия), рассчитанных по 23 сценам съемки Landsat 8 за различные сезоны в период 2013–2021 г. Для каждой из энергетических переменных выделены ведущие факторы пространственно-временного варьирования – инварианты. Показано, что исследуемый ландшафт в основном пребывает в трех состояниях: летнем, зимнем и переходном, однако тепловое поле, фиксируемое сенсорами Landsat 8, практически не испытывает переходного состояния. Для полученных инвариантов осуществлено сравнение с характеристиками растительности и почв, измеренными в поле.

Abstract. The principal component method was used to estimate the spatial-temporal distribution of energy characteristics in mountain forest ecosystems near the Khordol-Sardag ridge (Northern Mongolia) using 23 Landsat scenes from 2013 to 2021. The driving factors of spatial-temporal variation were identified and named "invariants". The results demonstrate that the researched landscape is mainly characterized by three states: summer, winter, and transitional. However, as recorded by Landsat 8 sensors, the thermal field is not in a transitional state. The article shows a comparison between "invariants" and soil and vegetation properties measured in the field.

Ключевые слова: термодинамические характеристики, эксергия, самоорганизация, тепловое поле, кедровые леса

Keywords: thermodynamic characteristics, exergy, self-organization, thermal field, cedar forests

Введение. Лесные ландшафты занимают около 7% от всей территории Монголии [10] и порядка 80% из этой площади – горные лесные ландшафты, сосредоточенные на севере страны. Там же, в условиях резко-континентального климата, распространены многолетнемерзлые породы. Таким образом, лесные экосистемы Северной Монголии играют ключевую роль для окружающих территорий как фактор сохранения вечной мерзлоты (и, соответственно, огромных запасов углерода) и мощный регулятор стока в региональном масштабе, в частности, обеспечивая более половины объема стока Селенги и ее притоков в озеро Байкал [1]. В условиях глобального потепления и аридизации регионального климата, значение лесных экосистем возрастает: во-первых, они выполняют буферную функцию, сдерживая опустынивание, и, во-вторых, по некоторым оценкам [9] аккумулируют до 50% выбросов парниковых газов Монголии и вместе с почвами консервируют значительное количество углерода, определяя направление и интенсивность его потока. В настоящее время эти экосистемы, испытывают значительный стресс, обусловленный выпасом, рубками и пожарами [1,6]. При этом, горные леса являются одним из наиболее сложных объектов исследования. Большая изменчивость рельефа, различная крутизна и ориентация склонов, вариабельность видового состава растительности, трудности методического и экспедиционного характера обуславливают общую слабую изученность этих ценных и уязвимых сообществ. Однако развитие дистанционного зондирования позволило в последние десятилетия не только получить набор методов для отображения различных свойств экосистем, но и инструментарий для прямых оценок их биофизических параметров – энергетических переменных. Вместе с цифровыми моделями рельефа, климатическими и фенологическими пространственными базами данных, данные дистанционного зондирования (ДЗ) открывают принципиально новые возможности в исследовании структуры и организации горных лесных экосистем.

Материалы и методы. Объектом исследования являются горные ландшафты, расположенные к северу от заповедника Улаан-Тайга, в северном секторе хребта Хорьдол-Сарьдаг. Они представляют собой горно-таежные подгольцовые кедровые леса и альпийские луга, на, в основном, органогенных почвах с многолетнемерзлыми горизонтами. Территория подвергалась оледенению по меньшей мере дважды в течение позднего плейстоцена [7,8]. Коренные подстилающие породы представлены в основном известняками (Кембрийские отложения). Область характеризуется экстремально континентальным климатом с теплым, влажным летом и очень холодной, сухой зимой. Среднегодовая температура в период с 1975 по 2015 год, по ближайшей метеостанции, расположенной в 30 км от исследуемого участка в сомоне Рэнчинлхумбэ (1573 н.у.м.), составляла 6,9 °С. Средняя температура января – -32,3 °С, июля – 13,8 °С [8]. Годовое количество осадков равно 263 мм, при этом 70% влаги поступает в период с июня по август. Полевые измерения свойств экосистем (комплексные описания почвы и растительности, измерения сумм площадей сечений древостоя и индекса листовой поверхности) осу-

ществлялись на трансекте длиной 1 км с шагом опробования 20 м, заложенном вдоль склона южной экспозиции от 2000 до 2350 н.у.м. (99°56'35"с.ш., 50°53'54"в.д.).

Полевые исследования проводились на точках опробования километровой трансекты, которая была заложена вдоль склона южной экспозиции от 2000 до 2350 н.у.м. (99°56'35"с.ш., 50°53'54"в.д.). Через каждые 20 м по трансекте были инструментально измерены свойства экосистем. Также проведены комплексные описания почвы и растительности, измерены суммы площадей сечений древостоя и индекса листовой поверхности.

В качестве измерительной системы биофизических параметров ландшафтного покрова использована мультиспектральная съёмка спутников семейства Landsat 8 OLI TIRS с пространственным разрешением 30x30 м. Для периода с 2013 по 2021 г. были обработаны 23 безоблачные сцены (табл.).

Таблица. 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

Расчет составляющих энергетического баланса и структурно-информационных характеристик, осуществлялся по методике, предложенной Ю.Г. Пузаченко и Р.Б. Сандлерским [4] и опробованная для различных типов ландшафтного покрова, в том числе и для горных лесных ландшафтов Приэльбрусья [3,5]. Для каждой из 23 сцен были получены следующие параметры преобразования солнечной энергии: приходящая солнечная энергия (солнечная постоянная с учетом высоты солнца на момент съемки), альбедо, поглощенная солнечная энергия, эксергия солнечной радиации (затраты на эвапотранспирацию), связанная энергия (рассеяние энергии в атмосферу с тепловым потоком и энтропией), вегетационный индекс. Также был рассчитан ряд информационных мер, характеризующих структуру системы: энтропия отраженной солнечной радиации, неравновесная энтропия Тсаллиса, приращение информации по Кульбаку, мера самоорганизации Форстера. Все расчёты осуществлены в двух системах: классической термодинамики Больцмана-Гиббса-Шеннона и в неэкстенсивной термодинамике Тсаллиса. Первая подразумевает линейность взаимодействия между элементами системы, а вторая – экспоненциальное, определяемое расчетным значением так называемого q-параметра (параметр деформации, q-индекс). Собственно, параметр деформации, входящий в функцию Тсаллиса, определяет нелинейность отношений между элементами. В динамической системе $q=1-1/p$, где $p>0$ – коэффициент корреляции. То есть, чем больше q превышает единицу, тем больше внутренние корреляции и более организована система. Реальные экосистемы по умолчанию неравновесны и нестационарны, т.е. имеют потенциал для преобразования и внутренний порядок, поддерживаемый за счет наличия внешних ресурсов (притока энергии). Отклонения от стационарности свидетельствуют о нерегулярных воздействиях внешних факторов (управляющих параметров). Таким образом, параметр q можно рассматривать как меру стационарности. При отклонении q от 1, система либо демонстрирует признаки дегградации (при $q<1$), либо демонстрирует нестационарные процессы характерные для активного развития "живых систем". Теоретически, разность между энергетическими переменными, полученными в рамках двух моделей (классической линейной и неэкстенсивной) должна показать нам области с наиболее активным и нестационарным взаимодействием элементов системы (компонентов ландшафта). Полная методика расчетов и первичные результаты такого рода анализа изложены в последних работах Ю.Г.

Пузаченко с соавторами [2]. Пространственно-временное варьирование энергетических переменных и параметров структурно-функциональной организации обобщалось путем выделения инвариантных состояний методом главных компонент (РСА) сначала для каждой переменной за 23 срока отдельно, затем, для сезонных групп инвариантов переменных.

Результаты. Сезонный ход составляющих энергетического баланса и температуры деятельной поверхности соответствует сезонному ходу приходящей солнечной радиации (табл.) с максимумом в конце июня – середине июля и минимумом в январе. На рисунке 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.

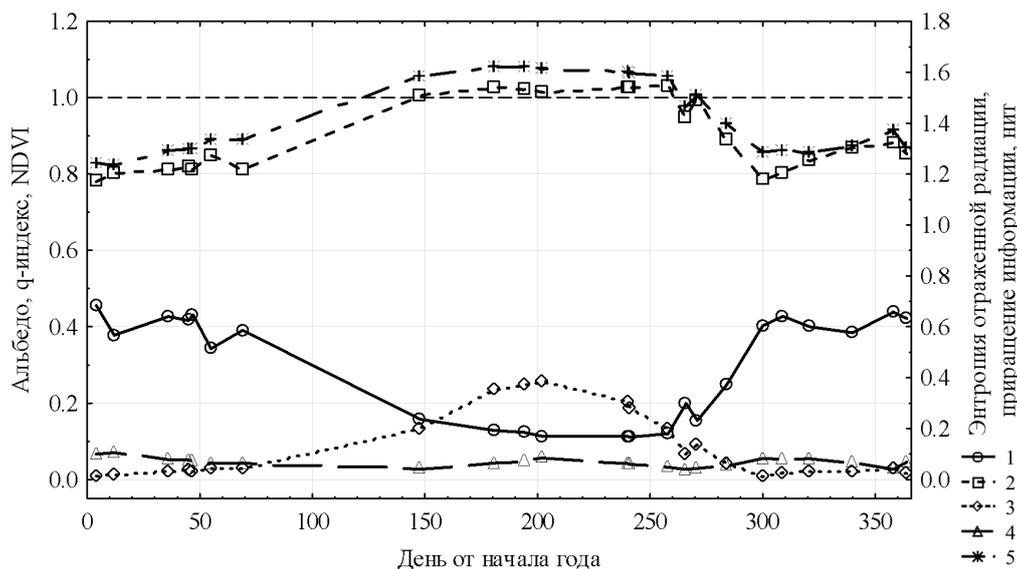


Рис. Сезонный ход структурно-информационных характеристик для исследуемой территории: 1 – альбедо, 2 – q-индекс, 3 – вегетационный индекс NDVI, 4 – приращение информации по Кульбаку (нит), 5 – энтропия отраженной солнечной радиации (нит)

Выделение инвариантных состояний (параметров порядка) энергетических и информационных переменных на основе метода главных компонент, показало, что для каждой переменной достаточно трех факторов. Варьирование каждой переменной на протяжении 23 сроков описывается тремя компонентами в среднем на 85%. Исключением является тепловое поле, для описания варьирования которого достаточно двух факторов (летнего и зимнего). Анализ показал, что ландшафтный покров может находиться в трех состояниях: зимний (с октября по март), летний (с июня по сентябрь) и переходный (март и сентябрь). Анализ динамики переменных для различных типов ландшафтного покрова показал общее соответствие результатам, полученным для других территорий (ЦЛГЗ). Однако отмечены некоторые исключения, обусловленные, по-видимому, ранним временем съемки и горным рельефом. Так, температура деятельной поверхности, фиксируемая сенсором, максимальна на территориях без растительности даже зимой, когда часть из них под снегом, а индекс продуктивности в течение всего года был ниже для лесостепей, чем для лесов. Анализ зависимости термодинамических характеристик от свойств растительности, показал, что в летний период продуктивность увеличивается с ростом индекса листовой поверхности, а в переходные периоды – с ростом суммы площадей сечений. По мере увеличения последней, уменьшается тепловое рассеяние энергии в атмосферу. Зависимостей между варьированием характеристик и результатами почвенных исследований не выявлено.

Заключение. Пространственно-временное варьирование энергетических характеристик для кедровых лесов (приурочены к склонам южной экспозиции) и кедрово-лиственничных лесов (приурочены в основном к северной экспозиции) весьма сходно в летний период, но различается в переходные периоды и в зимний период: период активной работы у кедровых лесов больше. Полученные соотношения энергетических характеристик в целом соответствуют результатам подобного анализа для южно-таежных ландшафтов (ЦЛГЗ), за исключением сезонной динамики температуры (орографический фактор) и индекса продуктивности (низкий индекс продуктивности лесостепных сообществ). Зависимости энергетических характеристик от основных свойств растительности, полученные для рассматриваемого участка исследуемой территории (трансекта 1 км), в целом соответствуют результатам подобных оценок для южно-таежных ландшафтов.

Полученные результаты позволяют скорректировать методологию дальнейшего исследования структурно-функциональной организации горных лесных экосистем Северной Монголии. В частности, выработать стратегию оценки вклада рельефа и морфометрических характеристик в варьирование

энергетических переменных (оценивать вклад рельефа для каждого срока съемки или исследовать вклад рельефа в инварианты). Таким образом, появляется возможность скорректировать схему и состав полевых измерений свойств экосистем для следующих ключевых участков.

Благодарности. Коллективу Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АНМ. Работа выполнена при поддержке РФФ № 22-27-00781.

Литература

1. Бажа С.Н., Гунин П.Д., Дробышев Ю.И., Екимова Н.В., Прищепа А.В. О региональных особенностях процессов обезлесивания на южной границе хвойных лесов Монголии // Лесной вестник. 2008. №. 2. С. 44-55
2. Пузаченко Ю.Г., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю., Сандлерский Р.Б., Широия И.И. Оценка термодинамических параметров ландшафтного покрова по мультиспектральным измерениям отражённой солнечной радиации Landsat на основе неэкстенсивной статистической механики // Доклады Академии наук. 2019. Т. 487(3). С. 310-316
3. Пшегусов Р. Х. Пространственно-временная изменчивость спектральных и термодинамических индексов хвойных лесов охраняемых территорий Центрального и Западного Кавказа // Горные экосистемы и их компоненты. – 2019. – С. 245-246.
4. Сандлерский Р. Б., Пузаченко Ю. Г. Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // Журнал общей биологии. – 2009. – Т. 70. – №. 2. – С. 121-142.
5. Темботова Ф.А., Пшегусов Р.Х., Тлупова Ю.М., Темботов Р.Х., Ахомготов А.З. Состояние лесных экосистем горных территорий Кабардино-Балкарии по данным дистанционного зондирования // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. Т. 6. С. 89-97
6. Albrich K., Rammer W., Seidl R. Climate change causes critical transitions and irreversible alterations of mountain forests // Glob. Change Biol. 2020. V. 26(7). P. 4013-4027
7. Batbaatar J., Gillespie A. Outburst floods of the Maly Yenisei. Part II—new age constraints from Darhad basin // Intern. Geol. Review. 2016. V. 58(14) – P. 1753-1779
8. Moore P.E., Meyer J.B., Chow L.S., 2017, 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, 35 p.
9. Tsogtbaatar J. Forest policy development in Mongolia // Policy Interface Task Force Regional Meeting, Chennai. IUFRO Science. 2002. P. 60-69
10. Mongolia's Forest Reference Level submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change / UN-REDD Mongolia National Programme. Ministry of Environment and Tourism. Government of Mongolia. Ulaanbaatar. 2018. https://redd.unfccc.int/files/mongolia_2018_frl_submission_modified.pdf