

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ, ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
И ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

УДК 573(597.253)

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА
СРЕДНЕГОРНЫХ ТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ
НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА БИДУП-НУЙБА (ЮЖНЫЙ ВЬЕТНАМ)
ВО ВЛАЖНЫЙ СЕЗОН ГОДА ***

**Горбунов Р.В.^{1,2,3}, Горбунова Т.Ю.^{1,2,3}, Лебедев Я.О.^{1,2,3}, Кузнецов А.Н.^{1,2},
Кузнецова С.П.^{1,2}, Нгуен Данг Хой¹**

¹*Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и
технологический центр, г. Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам
e-mail: forestkuz@mail.ru*

²*ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН,
г. Москва, Российская Федерация*

³*ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация
e-mail: karadag_station@mail.ru, gorbunovatyu@gmail.com, ya.o.lebedev@yandex.ru*

Для условий зимнего влажного сезона получены картографические модели поступления суммарной солнечной радиации на поверхность крон ключевого участка, проанализировано поступление суммарной солнечной радиации в зависимости от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа, рассчитаны величины элементов радиационного баланса поверхности крон ключевого участка и пространственно-временная структура доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса. Проведено сравнение полученных данных в сухой и влажный сезоны. Рассчитаны величины элементов длинноволновой части радиационного баланса ключевого участка в период измерений. Полученные результаты позволили построить карту коэффициента пропускания пологом леса солнечной радиации в конце влажного сезона, что важно для понимания структуры радиационного баланса лесных экосистем.

Ключевые слова: радиационный баланс, суммарная солнечная радиация, рельеф поверхности крон, среднегорные тропические леса, Вьетнам, национальный парк Бидуп-Нуйба.

Введение

Формирование радиационного баланса горных тропических лесных экосистем характеризуется внутригодовой динамикой, связанной с чередованием влажных и сухих сезонов года. Эти сезоны определяют количество поступающей суммарной солнечной радиации и пространственно-временную дифференциацию потоков энергии в пределах лесного полога. В прошлой работе авторов (Горбунов и др., 2019) были представлены результаты исследований радиационного баланса среднегорных тропических лесных экосистем в условиях сухого сезона, характеризующегося преимущественно ясным

* Работа выполнена в рамках НИР Тропического центра Э-1.2 «Сохранение, восстановление и устойчивое использование тропических лесных экосистем на основе изучения их структурно-функциональной организации», раздел «Изучение особенностей структуры и функционирования равнинных и горных экосистем Вьетнама (национальные парки Бидуп-Нуйба)», а также в рамках НИР «Изучение пространственно-временной организации водных и сухопутных экосистем с целью развития системы оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий» № АААА-А19-119061190081-9.

небом и практически полным отсутствием атмосферных осадков. В данной работе нами поставлена задача проанализировать структуру и суточную динамику радиационного баланса в период влажного сезона, что с одной стороны потребовало принятия определённых допущений в процессе исследований, связанных с невозможностью регистрации данных в период ливневых осадков, но с другой стороны, полученные данные позволяют судить об особенностях формирования радиационного баланса в этом периоде, что является на сегодняшний день практически неизученной темой. Конечно, можно говорить о наличии данных реанализа, с помощью которых можно игнорировать проблемы наземных измерений. Однако в тропическом лесу величина солнечной радиации, поступающей под полог леса, в большей степени определяется, как было показано ранее, морфометрическими характеристиками кронового рельефа, который сильно дифференцирует значения солнечной радиации, поступающей на его поверхность (склоны кронового рельефа) и значения солнечной радиации, проходящей сквозь кроновое пространство, и в меньшей степени – характеристиками рельефа.

Таким образом, целью данной работы является выявить особенности формирования радиационного баланса горных тропических лесных экосистем в условиях влажного сезона и сравнение выявленных процессов с процессами, характерными для сухого сезона года.

Методика исследований

Исследования проводились в период экспедиционных исследований в декабре 2019 года на базе природного парка Бидуп-Нуйба. В основу исследований были положены материалы и методология, описанная в предыдущих работах авторов (Горбунов и др. 2018; Горбунов и др., 2019). В процессе экспедиционных исследований проводилась регистрация данных о пропускании суммарной солнечной радиации по стандартной сети точек, описанной в работе (Горбунов и др., 2019). С целью геоинформационного моделирования и представления картографических результатов исследований использовалась программа Arc GIS 10.2.

Результаты исследований и их обсуждение

На основе полученной цифровой модели поверхности крон были рассчитаны значения поступления суммарной солнечной радиации на середину декабря (15.12.2019 г. - средняя дата экспедиционных исследований) на 9:00, 12:00, 15:00 часов и в сумме за сутки. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

Из рисунка следует, что территория ключевого участка характеризуется пространственной неоднородностью в дифференциации величин суммарной солнечной радиации. Причем минимальные значения характерны в вечерний период, что связано с затенением солнечной радиации соседними хребтами. В целом следует отметить достаточно низкие значения суммарной солнечной радиации во влажный сезон, что связано с практически стопроцентной облачностью в этот сезон и ежедневными ливневыми осадками. Это обстоятельство ограничивало процесс измерений коэффициента пропускания солнечной радиации под полог леса, т.к. проводить измерения люксметром в период дождя технически невозможно. Это обстоятельство часто вызывало необходимость остановки процесса измерений. В то же самое время, продолжительность экспедиционных исследований позволило сформировать достаточный статистически достоверный набор данных, позволивших получить пространственную модель пропускания солнечной радиации во влажный сезон. Это обстоятельство упрощает тот факт, что за период экспедиции тип погодного состояния практически не изменялся.

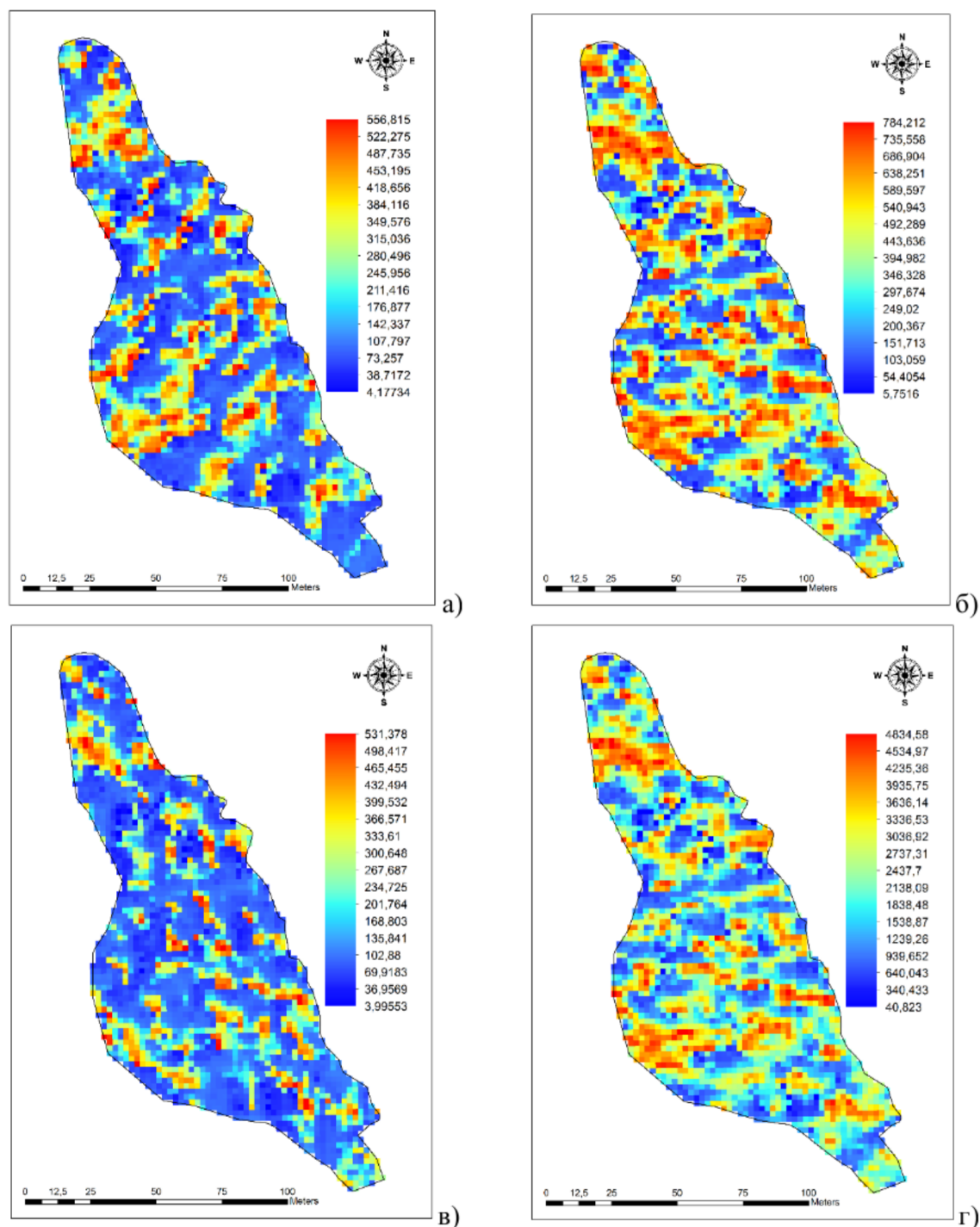


Рис. 1. Поступление суммарной солнечной радиации на территорию ключевого участка 15 декабря, Вт·ч/м²: а) 9:00; б) 12:00; в) 15:00; г) суточная сумма

С целью анализа пространственной дифференциации поступления суммарной солнечной радиации на поверхность кроны были рассчитаны средневзвешенные значения поступления суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа различной крутизны и экспозиции (табл. 1).

В течение всего дня максимум поступления солнечной радиации наблюдается на пологих (0–3°) склонах северо-западной экспозиции. Слабо крутые склоны (3–8°) кронового рельефа имеют явный и стабильный максимум при восточной и северо-восточной экспозиции, в то время как на склонах юго-восточной и юго-западной экспозиции максимальные значения поступления солнечной радиации наблюдаются при крутизне 8–15°.

Таблица 1.

**Расчётная величина поступления суммарной солнечной радиации
 (среднегодовое) 15 декабря (средняя дата полевых измерений экспедиции
 2019 года) в зависимости от крутизны и экспозиции кривого рельефа ключевого
 участка, Вт·ч/м²**

Экспозиция	Крутизна склонов (градации по В.О. Смирнову (2012))					
	0–3°	3–8°	8–15°	15–30°	30–45°	более 45°
9:00						
С	192,781	190,5	194,5	193,5	193,0	194,4
СВ		206,7	196,5	193,7	194,2	194,9
В		209,7	195,9	197,0	197,4	197,0
ЮВ		192,8	206,6	196,3	198,2	198,3
Ю		186,5	198,9	198,0	198,8	200,5
ЮЗ		196,7	200,2	196,2	198,7	197,2
З	154,2	201,7	193,5	193,1	197,5	196,7
СЗ	229,8	196,5	196,1	192,8	194,1	192,9
12:00						
С	376,5	369,4	376,2	376,9	376,4	376,3
СВ		383,2	378,0	376,1	376,0	376,6
В		390,0	374,5	378,6	378,5	378,6
ЮВ		373,4	382,7	378,5	378,3	378,2
Ю		348,2	378,0	379,4	377,8	380,6
ЮЗ		373,4	379,3	378,1	378,5	377,1
З	310,1	372,7	376,7	376,9	379,0	377,6
СЗ	438,8	361,6	378,1	376,6	376,4	376,4
15:00						
С	151,7	147,6	151,3	152,1	151,7	150,8
СВ		154,9	151,4	151,6	150,8	150,8
В		160,1	149,5	151,8	152,2	151,8
ЮВ		149,0	154,7	151,6	152,5	152,3
Ю		132,9	152,7	152,3	152,4	154,1
ЮЗ		150,4	152,2	151,5	152,6	151,6
З	115,5	149,6	151,6	151,9	152,3	151,7
СЗ	179,5	141,1	151,2	151,8	151,1	151,7
Сумма за сутки						
С	2122,4	2084,1	2123,8	2125,9	2122,9	2123,4
СВ		2185,0	2134,6	2123,7	2121,9	2125,5
В		2232,7	2116,2	2139,1	2141,5	2139,1
ЮВ		2104,3	2181,9	2136,9	2143,3	2143,2
Ю		1958,9	2143,1	2146,2	2142,2	2161,2
ЮЗ		2115,7	2150,1	2134,8	2145,5	2133,3
З	1721,1	2123,1	2125,0	2124,8	2142,6	2135,1
СЗ	2490,9	2055,5	2134,0	2123,2	2124,2	2122,6

Крутые (15–30°) и крайне крутые (более 45°) склоны кривого рельефа получают максимальные значения суммарной солнечной радиации при южной экспозиции. Сильно крутые (30–45°) склоны не имеют ярко выраженного максимума в поступлении солнечной радиации в зависимости от экспозиции – высокие значения наблюдаются на склонах южных румбов, а также на склонах восточной и западной экспозиций.

В течении дня поступления суммарной солнечной радиации на склоны кривого рельефа различных экспозиций практически не меняет своего максимума по крутизне и величины солнечной радиации закономерно растут к полудню и уменьшаются к вечеру. Исключением являются склоны северной, западной и юго-западной экспозиции, на которых максимум поступления суммарной солнечной радиации в течение дня смещается на более крутые склоны.

Таким образом наблюдается инсоляционная диссимметрия склонов кронового рельефа в зависимости от крутизны и экспозиции. Как видно из рис. 2, максимум суточного поступления суммарной солнечной радиации наблюдается на склонах северо-западной экспозиции. Немного меньшие значения имеют склоны восточной и юго-восточной экспозиций. Минимальными значениями в поступлении суммарной солнечной радиации обладают склоны западной экспозиции.

Если сравнить поступление суммарной солнечной радиации в сухой и влажный сезоны, схемы инсоляционной диссимметрии в целом схожи между собой, однако максимум поступления суммарной солнечной радиации со склонов северной экспозиции в сухой сезон смещается на склоны северо-западной экспозиции.

Аналогично проведенным работам по данным измерений во время сухого сезона, были рассчитаны величины элементов радиационного баланса поверхности кроны ключевого участка во влажный сезон (табл. 2).

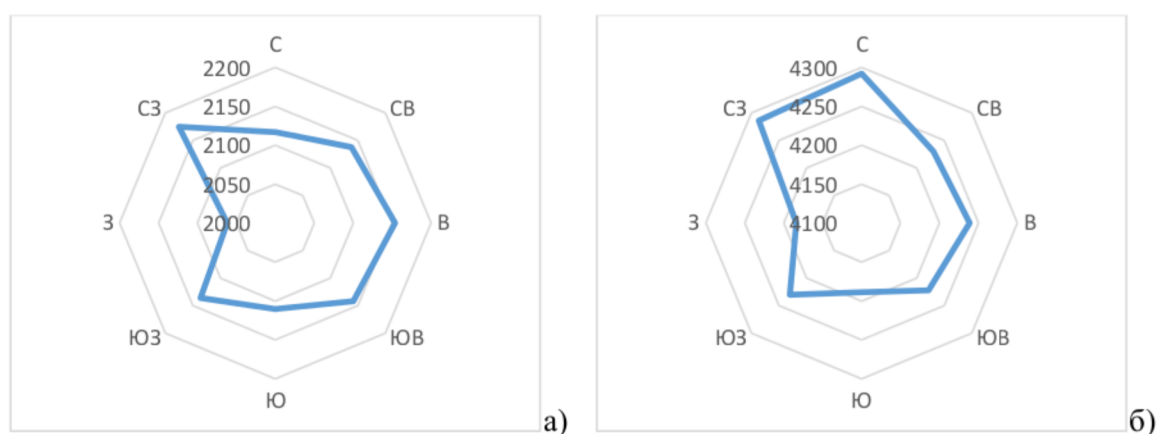


Рис. 2. Инсоляционная диссимметрия склонов кронового рельефа разной экспозиции, Вт·ч/м²: а) влажный сезон; б) сухой сезон

Таблица 2.
Величины элементов радиационного баланса поверхности кроны ключевого участка, Вт/м²

Элементы радиационного баланса		Время суток			Сутки
		9:00	12:00	15:00	
Суммарная солнечная радиация	средняя	192,8	376,5	151,7	2122,4
	максимальная	556,8	784,2	531,4	4834,6
	минимальная	4,2	5,8	4,0	40,8
Отражённая солнечная радиация	средняя	28,9	56,5	22,8	318,4
	максимальная	83,5	117,6	79,7	725,2
	минимальная	0,6	0,9	0,6	6,1
Поглощённая солнечная радиация	средняя	163,9	320,0	129,0	1804,0
	максимальная	473,3	666,6	451,7	4109,4
	минимальная	3,6	4,9	3,4	34,7

При сравнении рассчитанных значений получена следующая картина. В изменении элементов радиационного баланса во влажный сезон наблюдается снижение поступления солнечной радиации, однако изменения в течении дня имеют различную величину. В утренние часы поступление солнечной радиации уменьшилось в среднем на 51%, при это максимальные значения уменьшились на 22%, а минимальные – на 19%. В полдень наблюдается более существенные различия в значениях – в среднем поступление солнечной радиации уменьшилось на 44%, максимальные значения уменьшились на 15%, а минимальные – на 97%. В вечерние часы солнечная радиация снизилась на 58%, максимум поступления уменьшился на 25%, минимум – на 23%.

Проведенные в ходе экспедиции измерения освещенности под пологом леса позволяют построить пространственно-временную структуру изменения пропускания солнечной радиации в исследуемых точках ключевого участка (рис. 3).

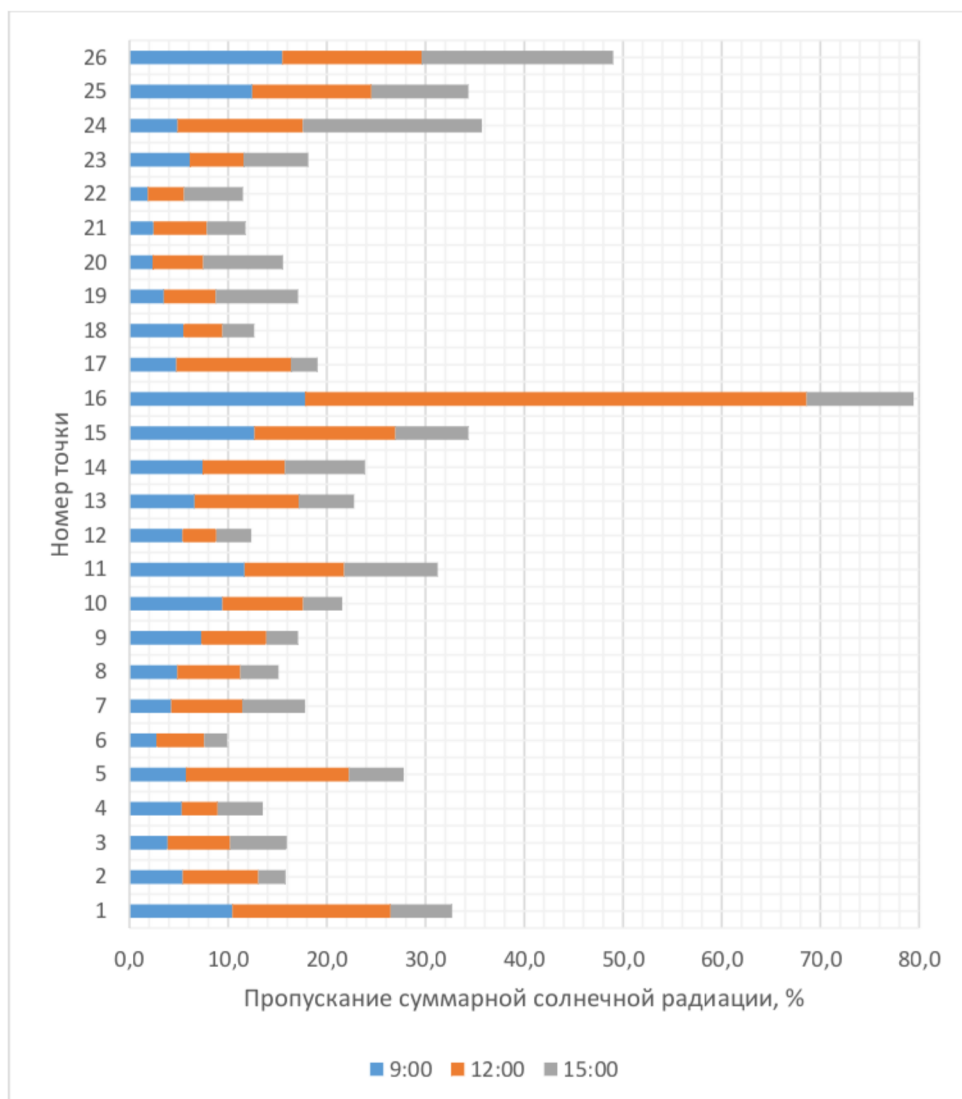


Рис. 3. Пространственно-временная структура доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса

Максимальные значения пропускания характерны для точки 16, при этом большая часть солнечной радиации поступает в полуденные часы. Значения выше среднего наблюдается для точки 26, где характер пропускания в течение дня примерно одинаков, с небольшим увеличением в вечерние часы. Следует отметить, что во время измерений в сухой сезон значения освещенности в точке 16 были ниже среднего. Максимум пропускания в сухой сезон наблюдался в точке 3. Кроме того, высокие значения были характерны для точек 19, 24 и 26.

Интерполяция полученных данных о пропускании солнечной радиации позволила получить пространственные модели этого явления и проанализировать его изменение в течение суток. На рис. 4 представлен суточный ход доли пропускания суммарной солнечной радиации под пологом леса.

Максимальные значения пропускания характерны для полуденных часов (рис. 4), однако они сконцентрированы в пределах юго-западной части ключевого участка и связаны с изменением общей сомкнутости лесного покрова – в интервале между экспедициями 2019 года в летний период произошёл сильный ветровал деревьев, что

вызвало появление в отдельных частях стационара широких окон. В то же самое время, если исключить высокие значения коэффициента пропускания в одной точке пространства стационара, полученные часы сохраняют максимальные величины доли пропускания, равные максимальным значениям в утренние и вечерние часы.

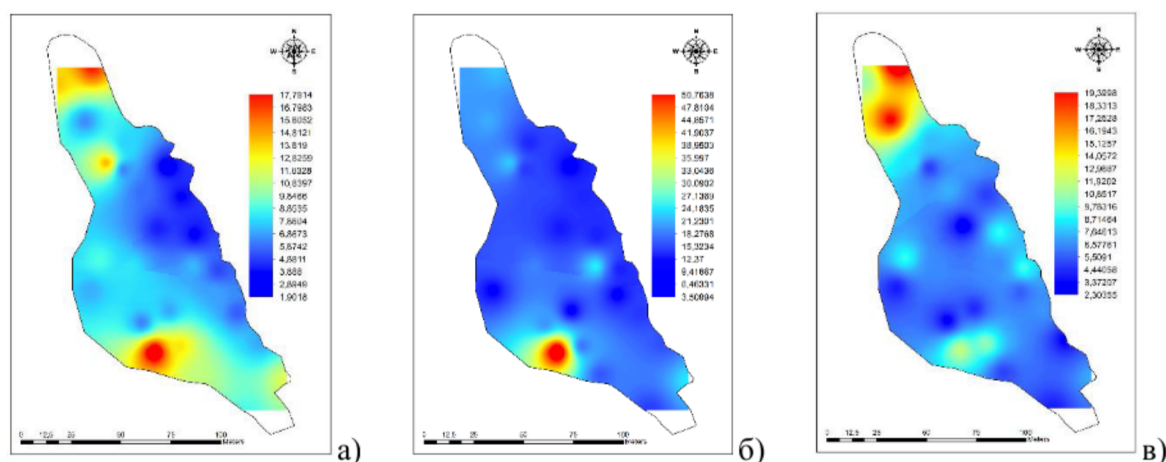


Рис. 4. Пространственная дифференциация доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса во влажный сезон на территории ключевого участка, %: а) 9:00; б) 12:00; в) 15:00.

Полученные пространственные модели пропускания позволяют сделать расчет количества суммарной солнечной радиации, проникшей через кроновое пространство. Результаты этих расчётов представлены в табл. 3. Из таблицы видно, что значения суммарной солнечной радиации во влажный сезон чрезвычайно малы и составляют в среднем $37,5 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в полдень. Однако при этом наблюдается сильная пространственная дифференциация распределения солнечной радиации, обусловленная долей пропускания через кроны.

Таблица 3.

Количество суммарной солнечной радиации, прошедшей через кроны деревьев, $\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$

Суммарная солнечная радиация	Время		
	9:00	12:00	15:00
влажный сезон			
средняя	13,0	37,5	10,1
максимальная	80,0	247,0	90,6
минимальная	0,2	0,4	0,3
сухой сезон			
средняя	19,43	22,89	7,10
максимальная	144,58	270,59	26,12
минимальная	0,38	0,94	0,27

Интересная особенность проявляется при сравнении значений в поступлении суммарной солнечной радиации в подкroновое пространство в сухой и влажный сезоны. Так, при сохранении закономерного суточного хода поступления солнечной радиации, в зимний влажный сезон средние значения суммарной солнечной радиации превышают аналогичные значения в сухой весенний сезон. При этом максимальные и минимальные значения суммарной солнечной радиации сохраняют максимум в сухой сезон. Это явление можно объяснить снижением угла падения солнечных лучей в зимний период при высокой крутизне кронового пространства, что определяет большие значения пропускания суммарной солнечной радиации в зимний влажный сезон.

Проникая под полог леса, коротковолновая солнечная радиация преобразуется в длинноволновую, составляющую длинноволновую часть радиационного баланса. Результаты расчёта элементов длинноволновой части радиационного баланса ключевого участка представлены в табл. 4. Следует отметить, что полученные значения не могут характеризовать реальную ситуацию, а представляют собой случайно выбранный день в период экспедиции (15 декабря 2019 г.), когда производились инструментальные измерения температуры и влажности воздуха под лесным пологом. В связи с этим, сравнение полученных значений со значениями сухого сезона, в период которого имеется статистически достоверный ряд измерений не представляется возможным.

Таблица 4.

**Величины элементов длинноволновой части радиационного баланса
ключевого участка в период измерений, Вт·ч/м²**

Суммарная солнечная радиация	Время		
	9:00	12:00	15:00
Влажный сезон			
Тепловое излучение подстилающей поверхности	440,4	421,2	415,7
Собственное тепловое излучение атмосферы	389,5	372,1	365,9
Эффективное излучение подстилающей поверхности (поверхность почвы, листовой опад, ярус трав)	50,9	49,1	49,8

В то же время имеющиеся данные позволяют оценить величину эффективного излучения во влажный зимний сезон, составляющую в среднем 49,1 Вт·ч/м², что при сопоставлении со средними величинами суммарной солнечной радиации, проникающей под полог леса, позволяет говорить об отрицательном радиационном балансе территории ключевого участка в зимний влажный сезон.

Заключение

В результате проведённых исследований получены значения элементов радиационного баланса среднегорных тропических лесных экосистем в пределах ключевого участка на территории национального парка Бидуп-Нуйба. Получены пространственные модели дифференциации элементов радиационного баланса ключевого участка и описаны пространственно-временные закономерности их дифференциации в зависимости от морфометрических характеристик кронового рельефа.

Выполнен сравнительный анализ закономерностей пространственно-временной дифференциации элементов радиационного баланса во влажный зимний и сухой весенний сезоны. Выявлено превышение значений пропускания суммарной солнечной радиации в подкروновое пространство во влажный сезон года, что связано с высокой крутизной кронового рельефа и снижением угла падения солнечных лучей.

На основании полученных значений элементов радиационного баланса сделан вывод о том, что рассматриваемые лесные экосистемы характеризуются отрицательным радиационным балансом в подкроновой части, что определяется высокими значениями эффективного излучения и свидетельствует об их высокой теплоёмкости.

Список литературы

1. Горбунов Р.В., Горбунова Т.Ю., Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П., Лебедев Я.О., Нгуен Д.Х., Ву М. Особенности формирования элементов радиационного баланса среднегорных тропических лесов южного Вьетнама // Труды Карадагской научной

- станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2019. Вып. 4(12). С. 3–16.
2. Горбунов Р.В., Кузнецов А.Н., Лебедев Я.О., Горбунова Т.Ю., Котлов И.П., Хой Н.Д. О некоторых особенностях структуры и функционирования горных тропических лесных ландшафтов центрального Вьетнама и необходимости создания ландшафтноэкологического стационара // Труды Карадагской научной станции им. Т.И.Вяземского – природного заповедника РАН. 2018. Вып. 3 (7). С. 43–67.
3. Смирнов В.О. Некоторые аспекты фитоактинометрических исследований в лесах заповедника «Мыс Мартьян» // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2012. Т. 8. Вып. 1–2. С. 104–109.

PECULIARITIES OF THE RADIATION BALANCE FORMATION OF THE MID-MOUNTAIN TROPICAL FOREST ECOSYSTEMS OF BIDUP-NUIBA NATURAL PARK (SOUTHERN VIETNAM) DURING THE WET SEASON

Gorbunov R.V.^{1,2,3}, Gorbunova T.Yu.^{1,2,3}, Lebedev Ya.O.³, Kuznetsov A.N.^{1,2}, Kuznetsova S.P.^{1,2}, Nguyen Dang Hoi¹

¹Russian-Vietnamese Tropical Center, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam

²A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Moscow, Russian

Federation, e-mail: forestkuz@mail.ru,

³A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: karadag_station@mail.ru, gorbunovatyu@gmail.com, ya.o.lebedev@yandex.ru

For the conditions of the winter wet season, cartographic models of the total solar radiation incoming to the crown surface of the key area were obtained. We analyzed the incoming of total solar radiation depending on the steepness and exposure of the crown relief. Values of the radiation balance elements of the key area crown' surface and the spatio-temporal structure of the total solar radiation part' transmission by the forest canopy were calculated. Comparison of the data obtained in dry and wet seasons was carried out. The values of the elements of the long-wave part of the radiation balance of the key area during the measurement period were calculated. The results obtained made it possible to construct a map of the transmission coefficient of solar radiation by the forest canopy at the end of the wet season, which is important for understanding the structure of the radiation balance of the forest ecosystems.

Keywords: radiation balance, total solar radiation, crown surface relief, mid-mountain tropical forests, Vietnam, Bidup-NuiBa National Park

Горбунов Роман Вячеславович	Кандидат географических наук, временно исполняющий обязанности директора, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: karadag_station@mail.ru
Горбунова Татьяна Юрьевна	Научный сотрудник научно-исследовательского центра геоматики, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: gorbunovatyu@gmail.com
Кузнецов Андрей Николаевич	Доктор биологических наук, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, согендиректор Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, e-mail: forestkuz@mail.ru
Кузнецова Светлана Павловна	Старший инженер Института тропической экологии, Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр

Лебедев Ярослав Олегович	Научный сотрудник научно-исследовательского центра геоматики, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: ya.o.lebedev@yandex.ru
Нгуен Данг Хой	Кандидат географических наук, директор Института тропической экологии, Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр, e-mail: danghoi110@gmail.com

Поступила в редакцию 11.06.2020 г.