

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ, ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
И ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

УДК 573(597.253)

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИАЦИОННОГО
БАЛАНСА СРЕДНЕГОРНЫХ ТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСОВ ЮЖНОГО ВЬЕТНАМА***

**Горбунов Р.В.^{1,2,3}, Горбунова Т.Ю.^{1,2,3}, Кузнецов А.Н.^{1,2}, Кузнецова С.П.^{1,2},
Лебедев Я.О.³, " 0 0 'Бу М.¹**

¹Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и
технологический центр, г. Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам
e-mail: forestkuz@mail.ru, " f c p i j q k 3 3 2 B i o c k l e q o "

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

³ФГБУН 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

В работе представлены результаты исследований радиационного баланса среднегорной тропической лесной экосистемы южного Вьетнама. Предложено наряду с рельефом поверхности территории выделять рельеф поверхности крон лесных деревьев. Получены сведения о поступлении суммарной солнечной радиации на поверхность крон, роль геоморфометрии кронового рельефа в пространственно-временной дифференциации элементов радиационного баланса. Для ключевого участка получены пространственные модели пропускания суммарной солнечной радиации кронами деревьев. Выявлено, что на величину пропускания оказывает влияние не столько общая сомкнутость крон, сколько плотность листового перекрытия. Установлено, что изучаемая лесная экосистема характеризуется отрицательным радиационным балансом в подкрановой части, что связано с перераспределением потоков вещества и энергии в подкрановом пространстве.

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

Введение

Изучение радиационного режима и радиационного баланса лесных экосистем – важнейший аспект при исследовании их структуры и функционирования. Именно потоки солнечной радиации выступают ведущими в лесной экосистеме и формируют энергетику всех процессов. Перераспределяясь в экосистеме, потоки солнечной радиации усложняют горизонтальную и вертикальную структуры экосистемы, создавая возможность или невозможность формирования большего количества ярусов и внутрифациальной структуры экосистем (Петлин, 2005, 2007; Горбунов и др., 2013).

* 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

Традиционными методами расчёта поступления солнечной радиации на поверхность рельефа участка местности являются методики, представленные, в частности, в работах К.Я. Кондратьева (1965), Р. Fu и Р.М. Rich (2000, 2002), которые, однако, не учитывают рельефа крон лесных деревьев. При этом, именно рельеф крон деревьев (крутизна и экспозиция), определяет количество солнечной радиации, которое поступает на верхнюю поверхность крон (верхнюю границу лесной экосистемы), и, соответственно, распределяется далее по ее вертикальным составляющим. Как правило, если учитывать крутизну и экспозицию крон деревьев, количество солнечной радиации может на отдельных участках значительно превышать рассчитанные значения поступления на склон рельефа, или наоборот, уменьшаться при условии формирования зон затенения. В тоже время для монодоминантных одновозрастных древостоев на равнине или выположенных участках горной местности величины поступления солнечной радиации будут приблизительно равны количеству солнечной радиации, рассчитанной для данной широты в данное время и при данной облачности на горизонтальную поверхность.

Учитывая тот факт, что наши работы проводятся в динамичных тропических лесных экосистемах, мы имеем дело с первым вариантом развития событий, т.е. с дифференцированным поступлением солнечной радиации на поверхность кронового рельефа и, соответственно, под полог крон лесных деревьев.

Целью представляемой работы являлось выявление особенностей перераспределения потоков солнечной радиации в условиях лесного пространства среднегорного муссонного тропического леса.

Для этого требовалось решение следующих задач:

1. Моделирование поступления суммарной солнечной радиации на поверхность крон и выявление связи морфометрических характеристик крон с пространственной дифференциацией суммарной солнечной радиации под полог;
2. Расчёт и пространственное моделирование величины пропускания суммарной солнечной радиации кронами деревьев;
3. Расчёт величин длинноволновой радиации в пространстве лесной экосистемы.

Материал и методы исследований

В качестве ключевого был выбран участок леса на территории национального парка Бидуп-Нуйба (Южный Вьетнам) (рис. 1). Обоснование выбора территории для создания ландшафтно-экологического стационара представлено в предыдущих работах авторов (Котлов и др., 2018; Горбунов и др., 2018).

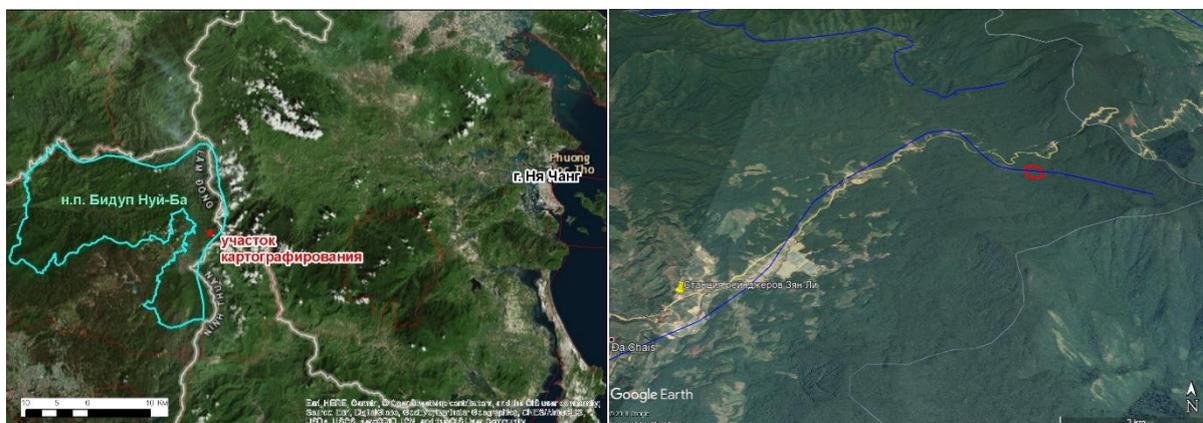


Рис. 1. Национальный парк Бидуп-Нуйба. Контур территории обозначен линией голубого цвета. Справа – площадка исследования в среднем масштабе (красный контур)

Ключевой участок стационара представлен пойменным высокоствольным лесным древостоем со следующими характеристиками. Ярус деревьев включает три подъяруса, т.е. вертикальная структура древостоя – среднесложная. Высота деревьев верхнего (первого) подъяруса 17–23 м, диаметры стволов 60–90 см, кроны радиусом 3–6 м, по форме овальные, овально-уплощенные и полусферические. В подъяресе представлены *Carpinus poilanari* (Betulaceae), *Exbucklandia tonkinensis* (Hamamelidaceae), *Dacrycarpus imbricatus* (Podocarpaceae), *Acer cambelli* (Sapindaceae), *Endospermum chinensis* (Euphorbiaceae), *Schima wallichii* (Theaceae), *Castanopsis* sp., *Lithocarpus* sp. (Fagaceae), *Magnolia* sp. (Magnoliaceae).

Второй подъярус высотой 12–17 м сложен деревьями с диаметром ствола 20–30 см: *Camellia* sp. (Theaceae), *Quercus* sp. (Fagaceae), *Sloanea sinensis*, *Elaeocarpus* sp. (Elaeocarpaceae), собственнокорневой *Ficus* sp. (Moraceae), *Syzygium* sp. (Myrtaceae), *Garcinia* sp. (Hypericaceae), *Illicium griffithii* (Illiciaceae), *Cinnamomum* sp., *Neolitsea* sp. (Lauraceae), *Ostodes* sp. (Euphorbiaceae), Gen. sp. (Ericaceae).

Третий подъярус – деревья высотой 1,5–5 м: *Eurya* sp. (Theaceae), *Ardisia* sp. (Myrsinaceae), *Psychotria* sp., *Lasianthus* sp., Gen. sp. (Rubiaceae), *Schefflera* sp. (Araliaceae), *Pinanga* sp. (Palmae), *Helicia* sp. (Proteaceae), *Cyathea* sp. (Cyatheaceae), Gen. sp. (Melastomataceae).

В древостое широко представлен разновозрастный подрост деревьев первого (*Castanopsis*, *Lithocarpus*) и второго (*Cinnamomum*, *Neolitsea*, *Elaeocarpus*, *Illicium*) подъярусов. Отмечены лианы из Rhamnaceae, Melastomataceae, Smilacaceae, Vitaceae, Myrsinaceae, Gnetaceae, Annanaceae.

Травы представлены родами *Impatiens* (Balsaminaceae), *Ophiopogon* (Asparagaceae), *Selaginella* (Selaginellaceae) – нередко формирует пятна диаметром 3–5 м, *Anemona* (Ranunculaceae), *Sarcandra* (Chloranthaceae), *Begonia* (Begoniaceae), *Alpinia* (Zingiberaceae), *Phyllagathis*, *Sonerila* (Melastomataceae), *Pelionia* (Urticaceae), *Argostemma* (Rubiaceae), *Acanthophyium* (Orchidaceae), *Strobilanthes* (Acanthaceae), *Asplenium* (Aspleniaceae), *Pandanus* (Pandnaceae), *Mapania* (Mapaniaceae), *Pentaphragma* (Pentaphragmataceae), *Angiopteris* (Marattiaceae), Gen. sp. (Gesneriaceae). Проективное покрытие травами на разных участках от 5 до 90%.

На стволах деревьев обычны древесные полуэпифиты из родов *Schefflera* (Araliaceae), *Ficus* (Moraceae), *Aeschinanthus* (Gesneriaceae); на стволах и в кронах деревьев – эпифиты из родов *Rhododendron*, *Vaccinium* (Ericaceae), *Dendrobium*, *Pholidota*, *Eria*, *Liparis* (Orchidaceae), *Hoya* (Arocynaceae), *Asplenium* (Aspleniaceae).

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе была произведена аэрофотосъемка ключевого участка и получена цифровая модель поверхности (Котлов и др., 2018). На основе цифровой модели были произведены расчёт морфометрических характеристик крон деревьев, а также моделирование поступления суммарной солнечной радиации на поверхность крон. Работы, связанные с пространственным моделированием осуществлялись при использовании стандартных модулей программы Arc GIS 10.3. На втором этапе проводилось изучение задержания суммарной солнечной радиации кронами деревьев. Для этого во время экспедиционных работ в апреле 2019 года под пологом леса на высоте 1 м над поверхностью почвы были произведены измерения поступления суммарной солнечной радиации. Измерения производились на территории ключевого участка по сети точек (рис. 2) с использованием цифрового измерителя освещенности DT-1309 по методике, изложенной в работе В.О. Смирнова (2012).

Для изучения температурного и влажностного режимов под пологом леса на территории стационара были установлены дата-логгеры, регистрирующие с периодичностью 1 раз в час температуру и влажность воздуха на высоте 0,5 м и 2 м над поверхностью почвы. Полученные данные позволили рассчитать величину

эффективного излучения поверхности почвы-опада на территории ключевого участка. Очевидно, что эффективное излучение также перераспределяется в зависимости от параметров древостоя, и не равно эффективному излучению, характерному для поверхности крон деревьев, но для понимания этих процессов необходимы дополнительные измерения вертикального профиля указанных параметров.

Результаты исследований и их обсуждение

В каждой точке (рис. 2) были получены значения высоты деревьев и подроста, сомкнутости крон по четырем высотным интервалам (H_1 – 16–23 м, H_2 – 9–15 м, H_3 – 5–9 м, H_4 – 4 м и ниже) и общей сомкнутости (табл. 1). Полученные значения сопоставлялись с величиной освещённости на открытом (контрольном) участке и по соотношению вычислялась величина пропускания суммарной солнечной радиации толщей крон лесных деревьев.

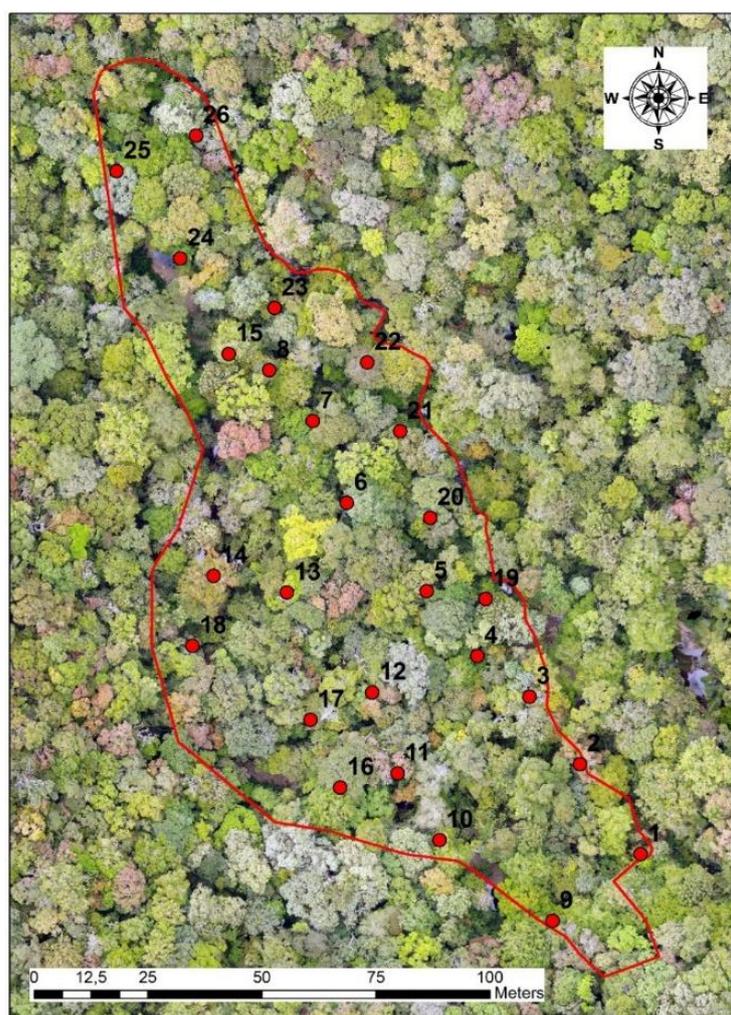


Рис. 2. Сеть точек измерений

Поступление суммарной солнечной радиации на различные наклонные поверхности при заданной высоте солнца определяется крутизной и экспозицией таких поверхностей. Построенная в ходе первого этапа работ цифровая модель поверхности позволила рассчитать крутизну и экспозицию рельефа крон (или кронового рельефа) ключевого участка, а также построить модель поступления суммарной солнечной радиации на поверхность крон при безоблачном небе (рис. 3).

Таблица 1.

**Распределение деревьев по интервалам высоты и сомкнутость в точках измерений
ключевого участка ландшафтного экологического стационара**

№ т.	Н ₁		Н ₂		Н ₃		Н ₄		ОС, %
	Н, м	С, %							
1	18	60	13	30	7	80	1,5	20	90
2	18	60	13	40	7	85	2	30	95
3	15	50	10	75			4	30	75
4	17	30	10	85			2,5	30	85
5	20	65	14	55			3	98	70
6	20	50	14	70	8	70	3	60	95
7	21	40	14	90			2,5	70	93
8	20	40	15	70	9	60	2,5	60	80
9	18	70	15	90			2	50	98
10	22	20	12	70			2	80	85
11	20	50	15	70			1,5	5	80
12	19	70	14	85	6	30	2	30	93
13	21	60	15	70	9	40	2,5	40	70
14	18	30	11	70	8	60	2,5	85	70
15	20	40	14	60	8	50	2,5	70	65
16	19	70	15	70			2	30	70
17	18	40	15	65	6	5	3	20	70
18	19	50	15	80	8	40	2,5	50	80
19	16	40	10	80			2	5	80
20	18	50	11	50	6	95	3	40	95
21	16	45	9	85			3	25	90
22	19	20	13	60	9	95	3	10	95
23	17	20	13	40	6	80	2	30	95
24	19	40	14	40	6	30	2	20	85
25	19	90	9	15	5	60	2	5	90
26	18	60	9	40			2	10	80

Примечание: Н – высота деревьев; С – сомкнутость; ОС – общая сомкнутость

В связи с тем, что поступление солнечной радиации определяется морфометрией рельефа, а мы анализируем снимок высокого пространственного разрешения, мы наблюдаем мозаичную картину распределения моделируемых параметров в разное время светового дня. Полагаем, что этим обусловлена пространственная мозаичность распределения разных видов деревьев, имеющих разную высоту и их подроста (за исключением деревьев верхнего интервала высоты). Учитывая, что в течение дня, высота Солнца меняется, а соответственно, меняется и угол падения солнечных лучей, меняется и пропускная способность полога крон в зависимости от набора характеристик для каждой точки наблюдений. Таким образом, в течение светового времени суток величина поступления солнечной радиации на каждую точку лесного пространства меняется не только за счёт изменения угла падения солнечных лучей, но и за счёт изменения конфигурации теневых масок. При этом, в утренние (6:00–8:00) и вечерние часы (16:30–18:00) на изучаемом участке наблюдается затенение кронами деревьев на соседних участках и смежными горными хребтами (грядами) и склонами, что снижает изначальную величину поступления суммарной солнечной радиации на поверхность крон и делает моделирование таковой практически невозможным. Такая ситуация типична для горных территорий. Моделирование поступления суммарной солнечной радиации на поверхность крон в нашем исследовании производилось без учёта этих особенностей.

Статистический анализ полученных моделей позволил выявить пространственную структуру поступления суммарной солнечной радиации в зависимости от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа (табл. 2).

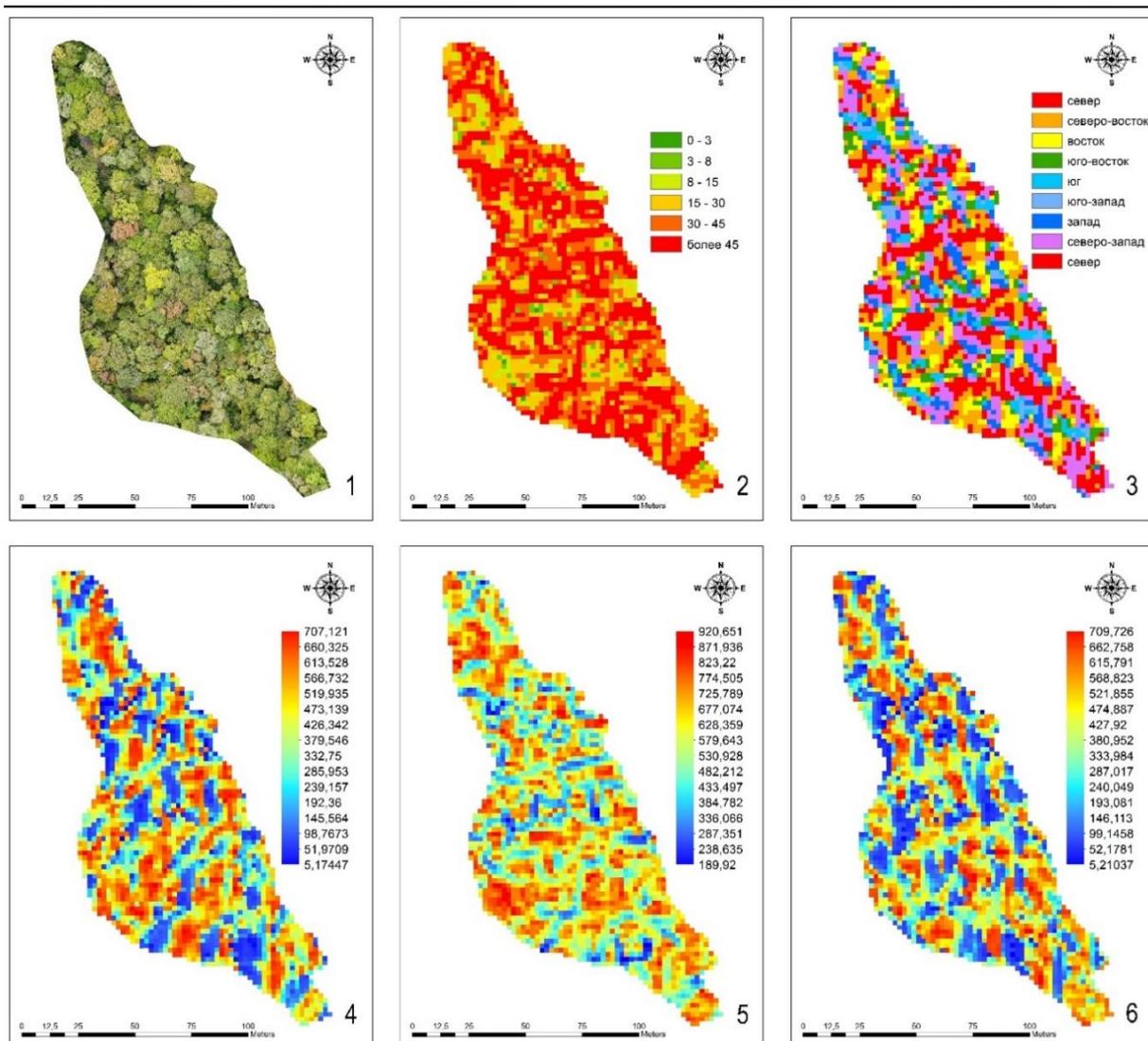


Рис. 3. Результаты моделирования поступления суммарной солнечной радиации на поверхность кроны ключевого участка: 1 – ортофотоплан ключевого участка; 2 – крутизна кронового рельефа, градусы; 3 – экспозиция кронового рельефа; 4 – поступление суммарной солнечной радиации на поверхность кроны в 9:00, Вт·ч/м²; 5 – поступление суммарной солнечной радиации на поверхность кроны в 12:00, Вт·ч/м²; 6 – поступление суммарной солнечной радиации на поверхность кроны в 15:00, Вт·ч/м²

Из таблицы 2 следует, что для склонов рельефа кроны северной экспозиции максимум количества суммарной солнечной радиации наблюдается на пологих склонах (0–3°). С увеличением крутизны происходит резкое снижение величины поступления суммарной солнечной радиации во все расчётные периоды. Вместе с тем, наблюдается некоторое увеличение количества суммарной солнечной радиации на крутых склонах (15–30°) в утренние часы, которое смещается на склоны средней крутизны (8–15°) в полдень, и возвращается на крутые склоны в вечерние часы. Таким образом, в целом за сутки незначительный максимум проявляется на крутых склонах. Максимум поступления суммарной солнечной радиации на склоны северной экспозиции наблюдается в 12:00, а величины поступления суммарной солнечной радиации в утренние часы несколько больше, чем в вечерние.

Склоны кронового рельефа южной экспозиции характеризуются обратной картиной. С увеличением крутизны рельефа происходит резкое увеличение поступления суммарной солнечной радиации. Максимум солнечной радиации наблюдается на крайне крутых склонах (более 45°).

Таблица 2.

**Расчётная величина поступления суммарной солнечной радиации
(среднегоголетняя) 10 апреля (средняя дата полевых измерений экспедиции 2019
года) в зависимости от крутизны и экспозиции кроневого 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	429,91	392,67	388,75	389,54	387,29	387,13
СВ		394,90	390,41	388,42	387,07	387,45
В		399,46	390,45	388,63	389,52	388,03
ЮВ		386,78	393,62	388,37	388,62	389,54
Ю		372,12	390,54	389,36	389,40	394,10
ЮЗ		388,14	398,86	388,25	389,27	388,65
З	356,60	393,09	387,44	387,11	388,53	389,42
СЗ	441,79	387,51	388,04	387,08	387,27	387,12
	12:00					
С	700,61	661,07	659,89	661,67	660,89	659,61
СВ		661,99	660,52	660,87	659,47	659,64
В		668,96	658,29	660,45	660,76	660,14
ЮВ		657,26	660,52	660,56	660,11	660,22
Ю		632,47	661,23	660,65	660,12	664,12
ЮЗ		656,91	665,26	660,28	660,30	658,30
З	630,86	655,87	660,81	661,09	660,61	660,45
СЗ	716,75	644,31	660,01	661,09	660,21	660,98
	15:00					
С	385,46	362,59	359,67	362,12	361,14	358,77
СВ		353,45	357,91	361,60	358,90	358,22
В		358,66	355,08	357,07	357,40	357,58
ЮВ		357,66	352,01	357,75	356,87	356,96
Ю		325,64	358,95	357,31	356,99	360,21
ЮЗ		355,25	358,85	357,53	357,36	356,29
З	339,72	347,42	361,24	361,86	357,05	358,46
СЗ	397,34	337,17	357,78	361,66	360,21	361,49
	Сумма за сутки					
С	4554,60	4259,86	4232,07	4246,52	4235,36	4223,87
СВ		4232,50	4233,29	4239,22	4223,79	4223,34
В		4292,85	4220,15	4226,20	4229,78	4224,80
ЮВ		4211,64	4220,01	4227,53	4223,87	4226,40
Ю		3990,86	4237,05	4228,56	4225,96	4260,12
ЮЗ		4206,80	4275,48	4225,46	4226,98	4215,33
З	3980,81	4192,09	4235,57	4237,24	4226,40	4231,63
СЗ	4672,00	4119,59	4224,76	4236,79	4230,33	4235,82

При этом, наблюдается некоторое снижение величин на крутых и сильно крутых (30–45°) склонах в 8:00, который смещается в 12.00 и в 15:00 в сторону сильно крутых склонов. Однако в утренние часы величины поступления суммарной солнечной радиации на склоны южных экспозиций этих градаций крутизны практически идентичны, что указывает на малую значимость изменения крутизны склонов южной экспозиции в пределах 15–45°. В целом за сутки снижение величин суммарной солнечной радиации на общем фоне роста в связи с увеличением крутизны склонов наблюдается на склонах сильной крутизны. Как и в случае со склонами северной экспозиции, максимум суммарной солнечной радиации на склонах южной экспозиции наблюдается в полдень, а в утренние часы величины суммарной солнечной радиации выше, чем в вечерние.

Для склонов кронового рельефа западной экспозиции в утренние часы минимальные значения величин суммарной солнечной радиации характерны для пологих склонов. С увеличением крутизны до градации слабо крутые склоны ($3-8^\circ$) происходит резкое увеличение значений суммарной солнечной радиации до её максимума. С дальнейшим увеличением крутизны наблюдается снижение величин суммарной солнечной радиации с некоторым увеличением на сильно крутых и крайне крутых склонах. В полдень ситуация меняется и снижение величин суммарной солнечной радиации на средне крутых и крутых склонах не происходит. Напротив, после резкого увеличения величин суммарной солнечной радиации от пологих до средне крутых склонов, наблюдается её незначительный рост до крутых склонов и дальнейшее незначительное снижение по мере увеличения крутизны склонов. В 15:00 наблюдается картина практически идентичная полуденной ситуации за исключением возникновения второго максимума величин суммарной солнечной радиации на крайне крутых склонах. Подобная ситуация повторяется при анализе распределения величин в сумме за сутки, однако второй максимум, характерный для крайне крутых склонов, наблюдаемый в 15:00 в сумме за сутки выражен не столь сильно. В целом, суточное распределение величин суммарной солнечной радиации аналогично, как и для склонов северной и южной экспозиций.

Поступление суммарной солнечной радиации на склоны восточной экспозиции в утренние часы аналогично склонам западной экспозиции, за исключением снижения величин суммарной солнечной радиации на крайне крутых склонах. В полдень ситуация совершенно иная, по сравнению со склонами западной экспозиции. Максимальные значения суммарной солнечной радиации характерны для слабо крутых склонов. Второй максимум формируется на сильно крутых склонах. Минимум значений суммарной солнечной радиации характерен для средне крутых склонов. В 15:00 происходит сохранение полуденной ситуации, за исключением смещения второго максимума на крайне крутые склоны. В целом за сутки наблюдается сильно выраженный максимум на слабопологих склонах. Второй максимум характерен для сильно крутых склонов. Минимум характерен для склонов средней крутизны. Суточное распределение величин суммарной солнечной радиации подчиняется ранее описанной закономерности.

Таким образом, отмечена инсоляционная диссимметрия в поступлении суммарной солнечной радиации на склоны северной и южной, западной и восточной экспозиций кронового рельефа изучаемого леса. Усреднение суточных данных поступления суммарной солнечной радиации на склоны различных экспозиций позволяет оценить инсоляционную диссимметрию склонов кронового рельефа (рис. 3).



Рис. 3. Инсоляционная диссимметрия склонов кронового рельефа разной экспозиции

Из схемы (рис. 3) следует, что максимум суммарной солнечной радиации на ключевом участке характерен для склонов северной и северо-западной экспозиций, а

минимум – для склонов южных румбов. Склоны восточной экспозиции получают больше суммарной солнечной радиации по сравнению со склонами западной экспозиции. Это явление важно с точки зрения формирования потоков вещества и энергии в лесной экосистеме и требует дальнейшего детального исследования.

Расчёт отражённой радиации от поверхности крон производился по формуле:

$$R = A Q, \quad (1),$$

Г,

де: R – отражённая радиация;

A – альbedo;

Q – суммарная солнечная радиация.

В связи с отсутствием данных наземных измерений альbedo, для определения его величины была использована работа коллектива авторов (Червяков, Котума, Спиряхина, 2017). Согласно карт, представленных в указанной работе, величина альbedo для исследуемой территории в апреле составляет 15 %. Данные в работе приведены с разрешением 2,5x2,5°. Принимая эту величину за основу по результатам пространственного моделирования были рассчитаны величины отражённой солнечной радиации для 9:00, 12:00 и 15:00 (табл. 3).

Следует отметить, что величины отражённой и поглощённой солнечной радиации завышены, т.к. часть солнечной радиации проникает сквозь кроны деревьев верхнего подъяруса под полог леса, где происходит ее отражение и поглощение.

Таблица 3.

Величины элементов радиационного баланса поверхности крон ключевого участка, Вт/м²

Элементы радиационного баланса		Время суток		
		9:00	12:00	15:00
Суммарная солнечная радиация	средняя	387,11	660,96	361,50
	максимальная	707,12	920,65	709,73
	минимальная	5,17	189,92	5,21
Отражённая солнечная радиация	средняя	58,07	99,14	54,22
	максимальная	106,07	138,10	106,46
	минимальная	0,78	28,49	0,78
Поглощённая солнечная радиация	средняя	329,04	561,82	307,27
	максимальная	601,05	782,55	603,27
	минимальная	4,40	161,43	4,43

Поэтому величина альbedo и отражённой солнечной радиации, представленные в таблице 3, характерны для поверхности крон, но не отражают структуры радиационного баланса лесной экосистемы в целом. С 2018 года нами начаты работы по изучению всей системы перераспределения энергетических потоков на ключевом участке среднегорного тропического леса. В частности, в 2019 году в период экспедиционных исследований были организованы работы по изучению пропускной способности крон.

Измерения освещенности под пологом леса позволили получить пространственно-временную структуру изменения освещенности в каждой точке и интерполировать эти значения на территорию ключевого участка (рис. 4).

Так, из рис. 4 следует, что имеется пространственно-временная неоднородность в пропускании суммарной солнечной радиации под полог леса. Для одних точек максимум пропускания наблюдается в утренние часы, а для других – в вечерние. В точке 3 максимум пропускания отмечается в полдень. Это зависит от наличия просветов в кронах деревьев, перпендикулярных углу падения солнечных лучей в разное время суток, и, как следствие, от «работы» теневых масок в пологе крон. Именно поэтому коэффициенты корреляции

показывают отсутствие связи между стандартными характеристиками структуры древостоя и долей пропускания суммарной солнечной радиации (табл. 4).

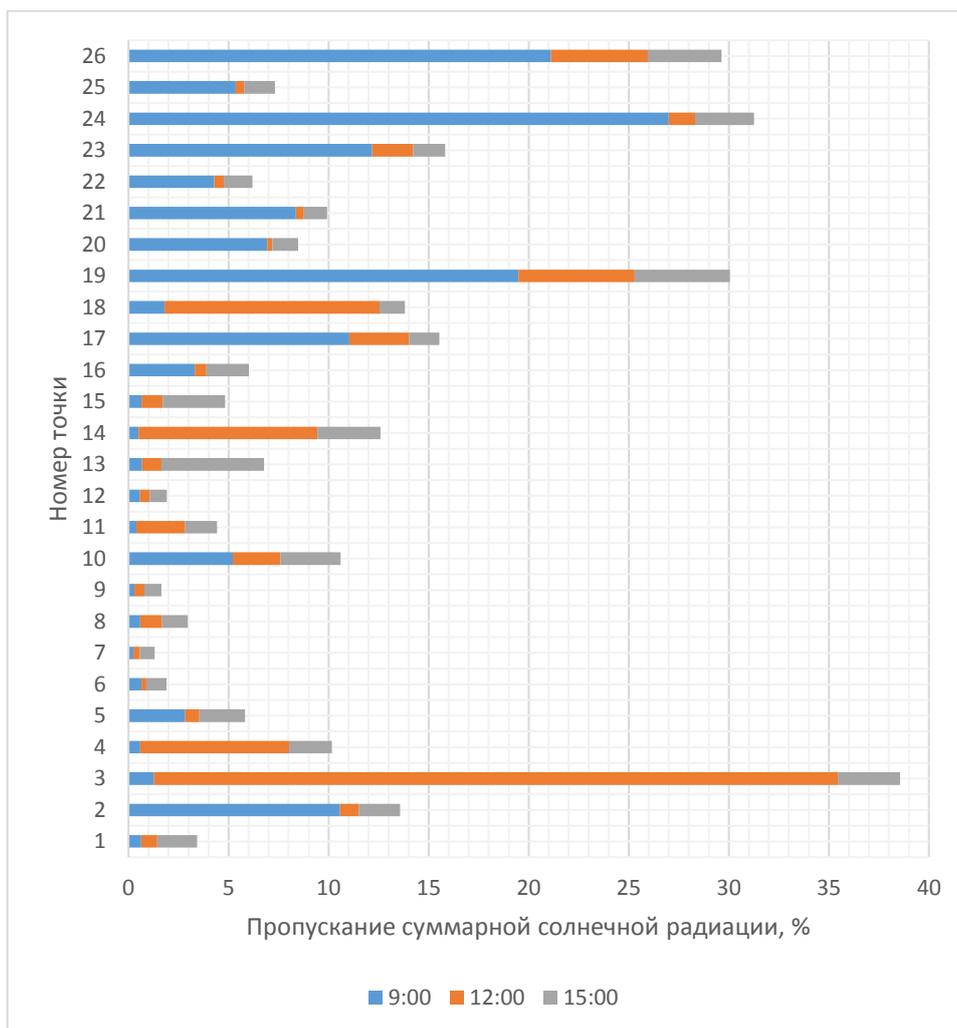


Рис. 4. Пространственно-временная структура доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса

Таблица 4.

Коэффициенты корреляции между долей пропускания суммарной солнечной радиации и характеристиками вертикальной структуры древесного яруса

Время	По интервалам высоты деревьев								ОС, %
	Н ₁		Н ₂		Н ₃		Н ₄		
	Н, м	С, %	Н, м	С, %	Н, м	С, %	Н, м	С, %	
9:00	-0,31	-0,13	-0,31	-0,40	-0,11	-0,08	-0,20	-0,45	0,06
12:00	-0,52	-0,11	-0,33	0,20	-0,21	-0,25	0,51	-0,04	-0,29
15:00	-0,06	-0,10	-0,25	-0,11	-0,06	-0,25	-0,06	-0,05	-0,58

Такая временная неоднородность формирует разные эффекты в функционировании экосистемы, т.к. известно, что в утренние часы максимум солнечной радиации тратится на нагрев поверхности, а в послеполуденные – на испарение (Огнева, 1967). В связи с этим, сложная структура пространственно-временной дифференциации величины поступления суммарной солнечной радиации под полог леса формирует сложные и сильно дифференцированные в пространстве леса процессы тепло- и влагопереноса.

Отсутствие корреляции между долей пропускания и характеристиками вертикальной структуры древостоя не позволило получить регрессионную модель связи указанных величин, и, как следствие, применить географическую интерполяцию величины пропускания суммарной солнечной радиации. Поэтому мы ограничились лишь математической интерполяцией. Пространственная структура величины пропускания суммарной солнечной радиации в разное время суток представлена на схеме (рис. 5).

Встроенные возможности программы Arc GIS 10.3 для расчёта полей солнечной радиации позволяют получить модели поступления суммарной солнечной радиации на территорию ключевого участка для любого выбранного среднемноголетнего интервала. Однако, отсутствие измерений пропускной способности во все сезоны года не позволяет судить о перераспределении суммарной солнечной радиации под пологом леса, но имеющиеся данные дают возможность рассмотреть приходную часть баланса. Вместе с тем, такое моделирование должно выполняться с учётом облачности и туманов, т.к. для изучаемой территории характерно сочетание сухих и влажных периодов. Расчёт величин поступления суммарной солнечной радиации во влажный период господства муссонов для безоблачного неба был бы некорректным. Поэтому на данном этапе мы ограничиваемся лишь сухим периодом, для которого характерно преобладание ясной погоды.

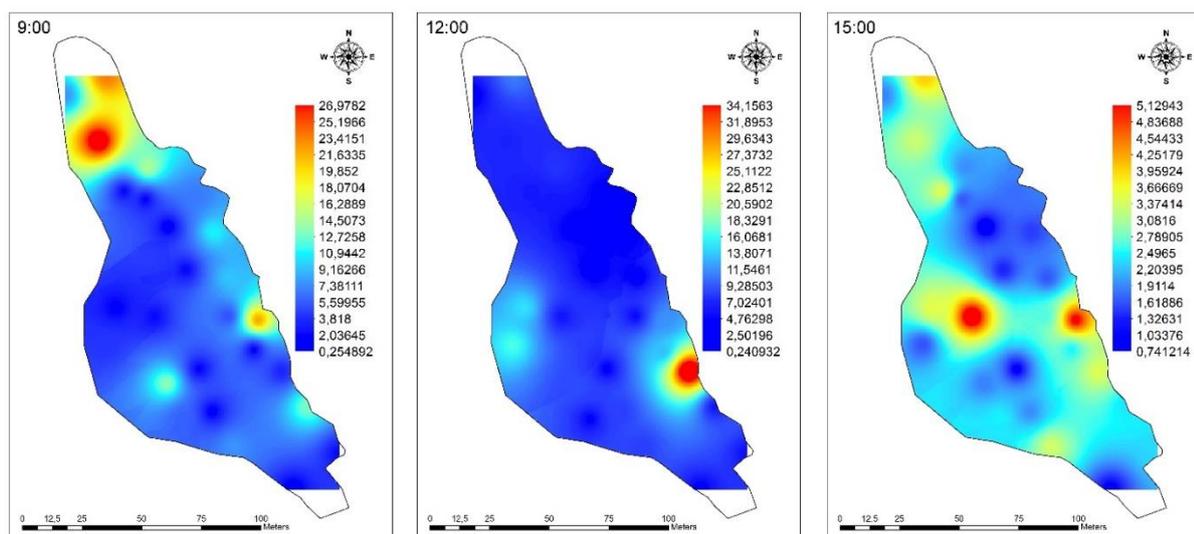


Рис. 5. Пространственная дифференциация доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса на территории ключевого участка, %

Часть суммарной солнечной радиации, проникшей под кроны деревьев также отражается и поглощается, формируя коротковолновую часть радиационного баланса. Однако расчёт величины отражения и поглощения под пологом леса требует дополнительных инструментальных измерений и в настоящее время не производился.

Анализ полученных растров и данных измерений позволил определить статистические характеристики величины пропускания суммарной солнечной радиации кронами деревьев (табл. 5).

Поглощенная солнечная радиация под пологом леса преобразуется в длинноволновую, представляющую собой поток теплового излучения подстилающей поверхности, направленный в сторону атмосферы и собственное тепловое излучение атмосферы, направленное к земной поверхности. Разность между величинами этих потоков определяет значение эффективного излучения.

Таблица 5.

**Количество суммарной солнечной радиации, прошедшей через кроны
деревьев, Вт/м²**

Суммарная солнечная радиация	Время		
	9:00	12:00	15:00
средняя	19,43	22,89	7,10
максимальная	144,58	270,59	26,12
минимальная	0,38	0,94	0,27

Расчёт значений элементов производился на основании формулы Д. Брента (Brunt, 1932) с использованием данных измерений, полученных на дата-логгерах. Усреднение произведено за период измерения пропускной способности кроны. Результаты расчётов представлены в таблице 6. Учитывая только одну точку измерений на территории ключевого участка, в настоящее время нет возможности получения пространственной модели указанных величин.

Таблица 6.

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

Суммарная солнечная радиация	Время		
	9:00	12:00	15:00
Тепловое излучение подстилающей поверхности	387,62	418,65	413,99
Собственное тепловое излучение атмосферы	251,21	271,38	268,40
Эффективное излучение подстилающей поверхности (поверхность почвы, листовой опад, ярус трав)	148,97	160,84	159,01

Несмотря на невозможность оценки коротковолновой части радиационного баланса, сравнение таблиц 2 и 3 позволяет судить об отрицательном радиационном балансе подкронового пространства леса, что связано с высокой теплоёмкостью леса и сложными процессами перераспределения потоков вещества и энергии в тропической лесной экосистеме.

Заключение

В результате проведённых исследований были получены первичные сведения об элементах радиационного баланса среднегорной тропической лесной экосистемы на базе ключевого участка в национальном парке Бидуп-Нуйба. По результатам экспедиционных исследований в сочетании с методами геоинформационного моделирования были получены сведения о поступлении суммарной солнечной радиации на поверхность кроны в сухой период при ясном небе, выявлена пространственно-временная внутрисуточная дифференциация величин суммарной солнечной радиации в зависимости от морфометрии кронового рельефа (крутизны и экспозиции склонов кроны деревьев). С использованием данных литературы рассчитаны элементы коротковолновой части радиационного баланса поверхности кроны.

На основе результатов полевых экспедиционных исследований получены пространственные модели пропускания суммарной солнечной радиации кронами деревьев. Выявлено сильная пространственно-временная неоднородность в пропускании суммарной солнечной радиации под полог леса, связанная не столько со структурой древостоя, сколько с плотностью листового перекрытия. Предложено наряду с рельефом поверхности территории выделять рельеф поверхности кроны лесных деревьев.

На основании данных полевых измерений получены величины элементов длинноволновой части радиационного баланса ключевого участка. Установлено, что изучаемая лесная экосистема характеризуется отрицательным радиационным балансом

в подкороновой части, что связано с высокими значениями эффективного излучения, формирующимися за счёт перераспределения потоков вещества и энергии в подпологовом пространстве.

Список литературы

1. Горбунов Р.В., Горбунова Т.Ю., Жаврук А.В., Лунашко И.П., Тышкевич М.Д. Внутрифациальная структура как фактор пространственной дифференциации солнечной радиации на топологическом уровне // Географические и геоэкологические исследования в Украине и сопредельных территориях: сборник научных статей / под общ. ред. Б.А. Вахрушева. – Симферополь: ДИАЙПИ, 2013. – Т. 1. – С. 27–31.
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 ландшафтно-экологического стационара // Труды Карадагской научной станции им Т.И.Вяземского – природного заповедника РАН. – 2018. – № 3 (7). – С. 43–67.
3. Кондратьев К.Я. Актинометрия. – Л. : Гидрометеорологическое издательство, 1965. – 690 с.
4. Котлов И.П., Горбунов Р.В., Фам Маи Фьонг, Дин Ву Ан Ту Беспилотная аэрофотосъёмка для задач крупномасштабного картографирования горных тропических лесных ландшафтов // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. – 2018. – Вып. 2 (6). – С. 63–84.
5. Огнева Т.А. Роль радиационного баланса в суммарном испарении // Тепловой баланс. Труды Главной Геофизической обсерватории им. В.И. Воейкова. – 1967. – Вып. 193. – С. 130–136.
6. Петлін В.М. Синергетика ландшафту. – Львів: ВЦ ЛНУ імені Івана Франка, 2005. – 205 с.
7. Петлін В.М. Стратегія ландшафту. – Львів: ВЦ ЛНУ імені Івана Франка, 2007. – 288 с.
8. Смирнов В.О. Некоторые аспекты фитоактинометрических исследований в лесах заповедника «Мыс Мартьян» // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2012. – Т. 8. – № 1–2. – С. 104–109.
9. Смирнов В.О. Оценка коэффициентов увлажнения территории Горного Крыма по экоморфе растительного покрова // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия: География. – 2012. – Т. 25 (64). – № 3. – С. 18–22.
10. Червяков М.Ю., Котума А.И., Спиряхина А.А. Атлас альбедо по данным измерений отраженных потоков коротковолновой радиации, полученных с помощью гидрометеорологического спутника «Метеор-М» № 1. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2017. – 57 с.
11. Brunt D. Notes on radiation in the atmosphere, I. – Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1932. – 58. – pp. 389–418.
12. Fu P., Rich P.M. A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Agriculture and Forestry // Computers and Electronics in Agriculture. – 2002. – 37. – pp. 25–35.
13. Fu P., Rich P.M. The Solar Analyst 1.0 Manual. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA, 2000.

**PECULIARITIES OF FORMATION OF RADIATION BALANCE ELEMENTS IN
THE MID-MOUNTAIN TROPICAL FORESTS OF SOUTHERN VIETNAM**

**Gorbunov R.V.^{1,2,3}, Gorbunova T.Yu.^{1,2,3}, Kuznetsov A.N.^{1,2}, Kuznetsova S.P.^{1,2},
Lebedev Ya.O.³, Pи вґр'F 0 0'XwO.⁴**

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

²*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Moscow, Russian Federation,
e-mail: forestkuz@mail.ru,*

³*A.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*

The article presents the study results of the radiation balance of the mid-mountain tropical forest ecosystem of South Vietnam. It is offered along with a relief of the surface area to allocate a relief of a forest trees crowns' surface. The data on the total solar radiation incoming on the crown surface and the role of crown relief geomorphometry in the spatio-temporal differentiation of radiation balance elements are obtained. Spatial models of total solar radiation transmission by tree crowns are obtained for the key area. It is revealed that the transmission value is influenced not so much by the total crowns closure as by the leaves overlap density. It is established that the studied forest ecosystem is characterized by a negative radiation balance in the sub-crown part, which is associated with the redistribution of substance and energy flows in the sub-crown space.

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

Поступила в редакцию 27.09.2019 г.