

## ГЕОГРАФИЯ ЗА РУБЕЖОМ

УДК 631.4:550.4:911.52(597.253)

DOI: 10.15372/GIPR20230114

**Я.О. ЛЕБЕДЕВ\***, \*\*\*, \*\*\*\*, **Р.В. ГОРБУНОВ\*\***, \*\*\*, \*\*\*\*, **Т.Ю. ГОРБУНОВА\*\***, \*\*\*, \*\*\*\*, \*\*\*\*\*,  
**А.В. ДРЫГВАЛЬ\***, \*\*\*, \*\*\*\*, **А.Н. КУЗНЕЦОВ\*\*\***, \*\*\*\*, **С.П. КУЗНЕЦОВА\*\*\***, \*\*\*\*,  
**НГУЕН ВАН ТХИНЬ\*\*\***, **Н.И. БОБКО\*\***, **С.В. КАПРАНОВ\*\***

\*Московское представительство ФГБУН ФИЦ  
 «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»,  
 119334, Москва, Ленинский пр., 38, корп. 3, Россия,  
 ya.o.lebedev@yandex.ru, drygval95@mail.ru

\*\*ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»,  
 299011, Севастополь, ул. Нахимова, 2, Россия,  
 karadag\_station@mail.ru, gorbunovaty@gmail.com, ni.bobko@yandex.ru, sergey.v.kapranov@yandex.ru

\*\*\*Совместный Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский  
 и технологический центр, 11307, Ханой, ул. Нгуен Ван Хуен, Вьетнам,  
 ya.o.lebedev@yandex.ru, karadag\_station@mail.ru, gorbunovaty@gmail.com, drygval95@mail.ru,  
 forestkuz@mail.ru, forestkuz@mail.ru, tinh39b@gmail.com

\*\*\*\*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,  
 119071, Москва, Ленинский пр., 33, Россия, ya.o.lebedev@yandex.ru, karadag\_station@mail.ru,  
 gorbunovaty@gmail.com, drygval95@mail.ru, forestkuz@mail.ru, forestkuz@mail.ru

\*\*\*\*\*Российский университет дружбы народов,  
 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия, gorbunovaty@gmail.com

### ДИНАМИКА ЗОЛЬНОСТИ МОРТМАССЫ И МИГРАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В СРЕДНЕГОРНЫХ ТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСАХ ЮЖНОГО ВЬЕТНАМА

*Представлены результаты исследования зольности растительного опада веток и опада листьев лесных растений коренных среднегорных тропических лесов Южного Вьетнама (национальный парк Бидуп-Нуйба) с целью выявления и уточнения элементов, поступающих в почву при их разложении. Показано различие в соотношении опада веток и опада листьев в образцах мортмассы, собранных в разных ландшафтных обстановках. Одновременно рассматривается влияние условий переменного и застойного увлажнения на протекание миграционных почвенных процессов. Точки отбора образцов опада веток и опада листьев соответствуют местоположениям почвенной катены в пределах структурной гряды, ее вершины, склона и подножия. Это позволяет связать полученные результаты элементного состава опада веток и опада листьев с геохимической миграцией химических элементов в различных геохимических ландшафтных условиях — от автоморфных до аккумулятивных. Осуществлена попытка установления объемов вещества, мигрирующего из мортмассы в почву вместе с водным раствором. Выявлены различия в накоплении зольных элементов в опаде веток и опаде листьев в зависимости от положения в разных ландшафтных обстановках. Установлен состав элементов, поступающих в почву с опадом веток и опадом листьев и вовлекаемых в геохимическую миграцию, а также оценен вклад опада веток и опада листьев в аккумуляцию и миграцию элементов при различных условиях увлажнения. Отмечена зависимость геохимических миграционных процессов от положения элементарной геохимической ландшафтной фации в катене, выражающаяся в изменении не только общей зольности опада и опада, но и соотношения зольности опада веток к опаду листьев.*

**Ключевые слова:** растительный опад, растительный опад, зольность, геохимическая миграция, тяжелые металлы, геохимическая катена.

Ya.O. LEBEDEV\*, \*\*\*, \*\*\*\*, R.V. GORBUNOV\*\*, \*\*\*, \*\*\*\*, T.Yu. GORBUNOVA\*\*, \*\*\*, \*\*\*\*, \*\*\*\*\*,  
 A.V. DRYGVAL\*, \*\*\*, \*\*\*\*, A.N. KUZNETSOV\*\*\*, \*\*\*\*, S.P. KUZNETSOVA\*\*\*, \*\*\*\*,  
 NGUYEN VAN THINH\*\*\*, N.I. BOBKO\*\*, S.V. KAPRANOV\*\*

\*Moscow Representative Office, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas,  
 Russian Academy of Sciences, 119334, Moscow, Leninskii pr., 38, korp. 3, Russia,  
 ya.o.lebedev@yandex.ru, drygval95@mail.ru

\*\*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences,  
 299011, Sevastopol, ul. Nakhimova, 2, Russia, karadag\_station@mail.ru, gorbunovatyu@gmail.com,  
 ni.bobko@yandex.ru, sergey.v.kapranov@yandex.ru

\*\*\*Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center,  
 11307, Hanoi, Nguyen Van Huyen str., Vietnam, ya.o.lebedev@yandex.ru, karadag\_station@mail.ru,  
 gorbunovatyu@gmail.com, drygval95@mail.ru, forestkuz@mail.ru, forestkuz@mail.ru, thinh39b@gmail.com

\*\*\*\*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences,  
 119071, Moscow, Leninskii pr., 33, Russia, ya.o.lebedev@yandex.ru, karadag\_station@mail.ru,  
 gorbunovatyu@gmail.com, drygval95@mail.ru, forestkuz@mail.ru, forestkuz@mail.ru

\*\*\*\*\*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),  
 117198, Moscow, ul. Miklukho-Maklaya, 6, Russia, gorbunovatyu@gmail.com

## DYNAMICS OF MORTMASS ASH CONTENT AND MIGRATION OF ELEMENTS IN DIFFERENT MOISTURE CONDITIONS OF MID-MOUNTAIN TROPICAL FORESTS OF CENTRAL VIETNAM

*The paper presents the study's results of ash content of twigs and leaves debris from forest plants of primary mid-mountain tropical forests of Central Vietnam (Bidoup Nui Ba National Park) in order to identify and clarify the elements that enter the soil during their decomposition. A difference in the ratio of twigs and leaves debris in mortmass samples collected in different landscape conditions is shown. At the same time, the influence of periodical and stagnant moisture conditions on the conduct of migratory soil processes is considered. The sampling points of the twigs and leaves debris correspond to the locations of the soil catena within the structural ridge, its top, slope and foothill. This allows us to relate the results obtained on the elemental composition of the twigs and leaves debris to the geochemical migration of chemical elements in different geochemical landscape conditions, from automorphic to accumulative. An attempt has been made to establish the volumes of matter migrating from the mortmass into the soil together with the aqueous solution. Differences in the accumulation of ash elements in the twigs and leaves debris depending on the position in different landscape conditions are revealed. The composition of elements entering the soil with twigs and leaves debris and involved in geochemical migration is established, and the contribution of leaves and twigs debris to the accumulation and migration of elements under different moisture conditions is evaluated. A dependence of geochemical migration processes on the position of the elementary geochemical landscape facies in the catena is pointed out, which manifests itself in a change not only in the total ash content of the twigs and leaves debris, but also in the ratio of ash content of twigs debris to that of leaves debris.*

**Keywords:** twigs and leaves debris, ash content, geochemical migration, heavy metals, geochemical catena.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследованиям условий развития зональных почв влажных тропиков посвящены многочисленные труды [1–8]. Вопросы изучения растительных сообществ тропических лесов отражены в работах Г. Вальтера [9, 10], М.Б. Горнунга [11], Н.Е. Кабанова [12], А. Ньюмена [13], П. Ричардса [14], А.Р. Уоллеса [15], А.А. Фёдорова [16]. В частности, изучению тропических лесов Вьетнама посвящены работы Т.В. Трунга [17, 18], О.Г. Чертова [6] и А.Н. Кузнецова [19–21].

Важным вопросом в изучении функционирования природных ландшафтов остается механизм биогеохимического круговорота веществ. При сравнении разных тропических территорий установлена корреляция в накоплении Cu, Mn, Co и Zn в почвах, а также в произрастающих на них растениях. При этом в растениях одного и того же вида наблюдается существенная вариативность в накоплении Cu, Mn, Co и Zn [22]. Для ферралитных почв равнинных лесов Южного Вьетнама характерным является накопление Zn и Cu, в почвах на базальтах — Ni, на сланцах — Pb и As [23].

В аспекте миграции химических элементов между горными породами и почвами (корами выветривания) важно, что в условиях влажных тропиков процессы преобразования материнских пород при обеспеченном дренаже детерминированы и не зависят от химического состава этих пород. Это ведет к накоплению в почвенной толще свободных соединений железа и алюминия, т. е. к формированию

ферраллитных почв. Исключение составляют лишь породы типа серпентинита, на которых формируются рыхлые железистые коры и почвы, содержащие в незначительных количествах соединения Al и Si. Оксиды железа, алюминия и марганца адсорбируются и совместно осаждаются с Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Zn из почвенного раствора, являясь эффективными предикторами содержания потенциально токсических элементов в почвах [24].

Принято считать, что образование глинистых минералов в наибольшей степени связано с величиной и характером годового атмосферного увлажнения. Так, в зоне тропиков изогиета, равная 50 мм, признана нижним пределом для высвобождения из кор выветривания свободных соединений гидроксидов железа и проявления тропической каолинизации. В целом глинистые минералы имеют очень важное регулирующее значение в тропиках, и с ними связаны химический и гранулометрический состав, а также физические свойства и плодородие почв [11]. Длительность сухого и влажного сезонов является определяющим параметром в накоплении Fe из первичных минералов. С высотой также происходит изменение соотношения глинистых минералов в тропических почвах в связи с увеличением количества годовых осадков, преобладанием длительных морозящих осадков, повышением содержания гумуса и снижением величины pH.

Химические элементы частично или более полно участвуют в процессах жизнедеятельности живых организмов. Так, для удовлетворительной жизнедеятельности растений необходимы C, H, O, N, P, S, K, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B, Na, Si, Co. Б.Б. Полюновым и А.И. Перельманом был введен коэффициент биологического поглощения — Кб, который позволяет оценить способность к накоплению элементов биомассой растений [25, 26], а В.В. Добровольский [27] разделил элементы на несколько групп. В первую группу вошли элементы с величиной Кб > 10, которые интенсивно захватываются растительностью (B, Br, I, Zn и Ag), во вторую — с величиной от 1 до 10 (Cu, Mo, Mn, Pb, Co, Ni, Hg, Se), в последнюю — элементы с величиной Кб < 1, которые слабо захватываются растительностью (Ga, Zr, Ti, Y, La) и образуют слаборастворимые формы. Накапливаясь в тканях растительности, химические элементы вовлекаются в биологическую миграцию. Некоторые из них физиологически необходимы для нормального обмена веществ в растениях (Mn, Zn, Cu), другие являются загрязнителями, в связи с чем степень вовлечения элементов в биологический обмен неодинакова [28]. Величина Кб различна для разных видов растений и применяется для оценки потенциала фитообеспеченности почвы доступными для растений химическими элементами (дефицита и фитотоксичности), но не позволяет оценить спектр потенциально доступных для растений химических элементов в почвах [29]. Кроме того, отмечается влияние на величину Кб тяжелых металлов и в целом потенциально токсических элементов [30, 31].

Особенности условий произрастания влажных тропических лесов проявляются в специфике распределения и годовой динамике масс зольных элементов в растительности [32, 33]. Так, в тропических лесах основная масса органических веществ содержится в растущих растениях, в первую очередь в деревьях, а также в слое растительного опада (мортмассы), который ежегодно формируется на поверхности почвы. Сезонность осадков обуславливает различие условий и скорости деструкции опада, а это влияет на скорость вовлечения химических элементов в биогеохимический круговорот и почвенные миграционные процессы в годовом цикле [13].

Связь накопления химических элементов в системе почва — растение изучалась многими исследователями, в том числе и на территории Вьетнама. Так, прослежено накопление Cd в почвах и плодах овощных культур в Северном Вьетнаме [34]. Отмечается, что в природе Cd обычно ассоциируется с Zn и, относительно слабо удерживаясь в почве, легко поглощается растениями и накапливается в них. В свою очередь, избыточное количество кадмия ингибирует микробиологические процессы почвы, а при концентрации 12 мг/кг нарушается фиксация атмосферного азота и затухают процессы аммонификации и денитрификации, т. е. для растений Cd является токсичным элементом. Установлено, что накопление в природных средах тяжелых металлов связано с бесконтрольным использованием удобрений и ядохимикатов. В ходе исследования, проведенного на юге Вьетнама, в провинции Донгнай, было установлено, что при высоких концентрациях  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  и  $Cd^{2+}$  могут мигрировать в глубокие слои почвы [35]. В результате использования на рисовых полях диоксинсодержащих пестицидов возможен вертикальный и латеральный перенос диоксинов, а также их вынос в реки и морскую акваторию; при этом показано, что в таких почвах образуются квазиколлоидные формы этих веществ [36, 37].

Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, являются продолжением работ по изучению геохимической миграции и перераспределения вещества в почвах соподчиненных ландшафтных фаций среднегорных тропических лесов Вьетнама. Полевые работы в национальном

парке Бидуп-Нуйба велись с целью выявления химических элементов, вовлекаемых в систему растительность–мортмасса–почва, а также для установления факторов, влияющих на распределение этих элементов в почвенных горизонтах и приводящих в том числе к формированию почвенных геохимических барьеров.

Накопление элементов в лесной растительности — один из детерминирующих факторов почвообразования в горной местности — осложняется процессами перераспределения вещества. Так, близость к поверхности грунтовых вод, степень и режим увлажнения почвы в течение года, крутизна и экспозиция склонов, механический состав почв могут существенным образом влиять на скорость и объемы аккумуляции вещества в растительности, а также на его химический состав. В связи с этим целью исследования является выявление и последовательное рассмотрение факторов, влияющих на накопление элементов в лесной растительности.

Для этого требовалось решить следующие задачи: провести сравнительный анализ образцов отпада и опада, собранных в разных геохимических ландшафтных обстановках (ландшафтных фациях); изучить особенности процесса разложения опадных масс; сравнить вещественный состав зеленой растительности и опадных масс для уточнения элементов, вовлекаемых в миграционный процесс; выявить элементы, мигрирующие из опадных масс в водный раствор в естественных условиях.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в декабре 2019 г. (начало сухого сезона) в среднегорных лесах национального парка Бидуп-Нуйба (Южный Вьетнам) — в границах ключевого участка (ландшафтного стационара) в интервале высот 1490–1580 м над ур. моря. Места отбора проб отпада веток и опада листьев соответствовали ранее выбранным точкам в соподчиненных ландшафтных обстановках (рис. 1) [38, 39]. Для последующего озоления отбирали средние пробы опада методом квартования. Также проводился отбор образцов зеленых растений (побеги с листьями и хвоей), таксономически соответ-

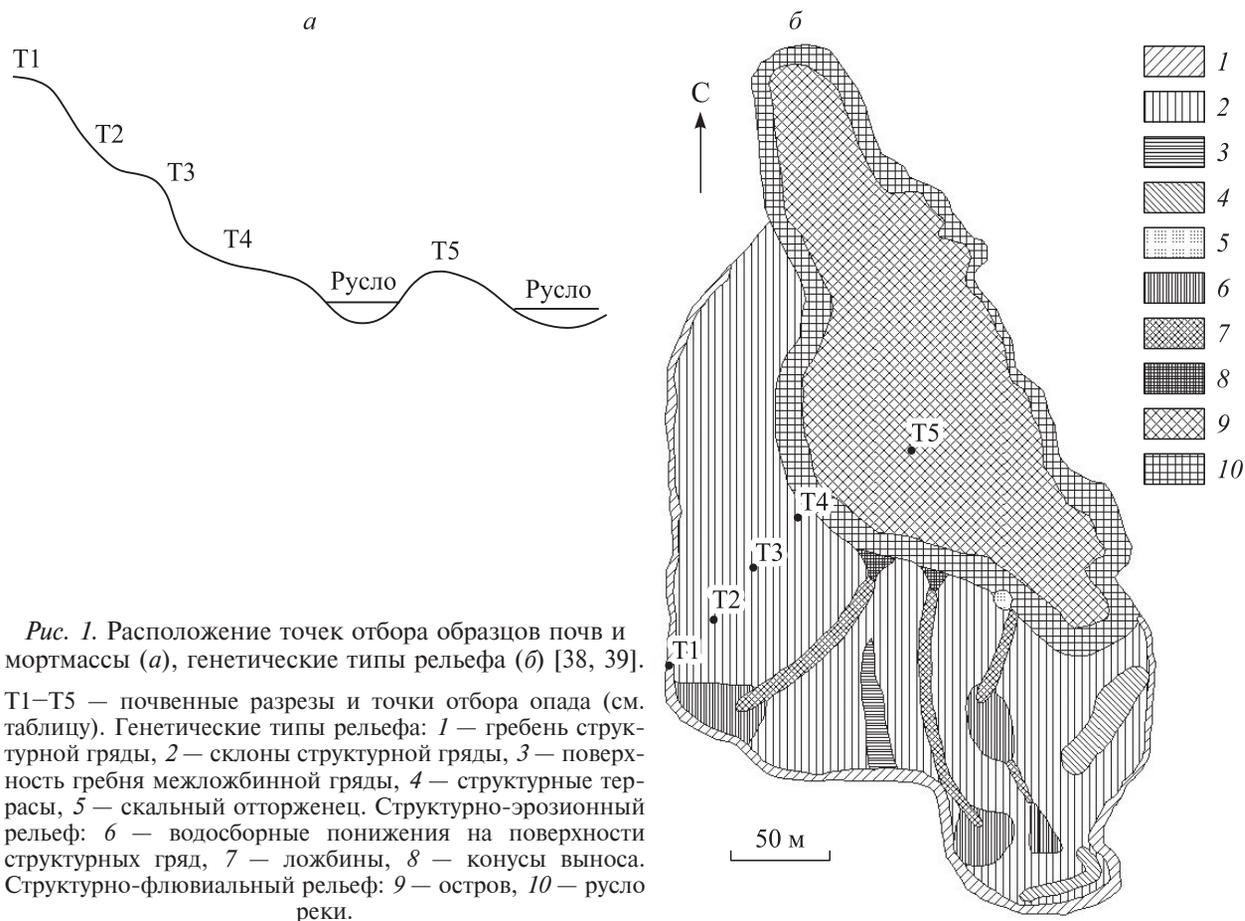


Рис. 1. Расположение точек отбора образцов почв и мортмассы (а), генетические типы рельефа (б) [38, 39].

T1–T5 — почвенные разрезы и точки отбора опада (см. таблицу). Генетические типы рельефа: 1 — гребень структурной гряды, 2 — склоны структурной гряды, 3 — поверхность гребня межложбинной гряды, 4 — структурные террасы, 5 — скальный отторженец. Структурно-эрозионный рельеф: 6 — водосборные понижения на поверхности структурных гряд, 7 — ложбины, 8 — конусы выноса. Структурно-флювиальный рельеф: 9 — остров, 10 — русло реки.

ствующих материалу отпада веток и опада листьев. На плакорной поверхности гребня структурной гряды в автоморфных условиях почвообразования со специально оборудованной обводненной площадки (площадью 0,2 м<sup>2</sup>) были отобраны образцы влажного отпада веток и опада листьев и их экстракта для определения элементного состава сухого остатка.

В лабораторных условиях проводили высушивание образцов до воздушно-сухого состояния, разделение отпада и опада на фракции — листья и ветки, измельчение фракций отпада и опада керамическим ножом, взвешивание фракций на аналитических весах, озоление в керамических тиглях в муфельной печи по методу сухого озоления [40]. Пробы подготавливались для последующего определения элементов в валовой форме (посредством 1 н азотной кислотой вытяжки) и в подвижной форме (посредством ацетатно-аммонийного буфера с рН 4,8). Определение элементов, в том числе тяжелых металлов, в вытяжках образцов проводилось с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой PlasmaQuant MS Elite S-NR:11–6000ST043 на базе научно-образовательного центра коллективного пользования «Спектрометрия и хроматография» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН».

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предполагаемое влияние факторов, специфичных для склоновых процессов, может проявляться в изменении количества аккумулируемого растениями вещества и отражаться в изменении зольности отпада и опада растений. Вместе с тем биогеохимический анализ растительности и оценка скорости геохимической миграции в системе растительность–мортмасса–почва могут позволить выявить особенности накопления и разложения мортмассы (на примере веток и листьев) по сезонам года.

Процентное соотношение отпада веток и опада листьев в образцах мортмассы, собранных в разных ландшафтных обстановках, и результаты последующего озоления этих образцов приведены в табл. 1. Видно, что в образцах растительной мортмассы с плакорных поверхностей и пологих низин на листья по массе приходится 70–80 %, соотношение отпада веток к опадению листьев составляет 0,3–0,4, тогда как на крутом склоне (уклон 30°) количество листьев снижается до 60 %, а соотношение отпада веток к опадению листьев, напротив, увеличивается до 0,6, что объясняется гравитационным смещением мортмассы по склону и перевеванием листьев. Так, на пологом участке склона, как и в аккумулятивных условиях, содержание листьев в опаде — почти 90 % (вследствие перевевания и смещения листьев из расположенных выше ландшафтных обстановок), соотношение отпада веток к опадению листьев — 0,12–0,14.

В зависимости от особенностей участка рельефа прослеживается изменение зольности мортмассы. Так, при переходе от локаций автоморфных условий зольность отпада веток и опада листьев снижается для трансаккумулятивных склонов и увеличивается к аккумулятивным локациям, достигая там максимальных значений. Зольность опада листьев от автоморфных условий к аккумулятивным и аккумулятивно-полугидроморфным возрастает в 2,1 и 1,6 раза, а зольность отпада веток — в 3,3 и 1,7 раза соответственно. Таким образом, рельеф (подножие склона, аккумулятивные условия) и стабильное увлажнение (близость грунтовых вод) определяют для участков в основании склона максимальные значения зольности отпада и опада 5 %. На крутых участках склона (трансаккумулятивные

Таблица 1

Зольность мортмассы, отпада и опада в ландшафтных обстановках

Точка отбора	Доля отпада веток в образце мортмассы, %	Доля опада листьев в образце мортмассы, %	Соотношение отпада веток и опада листьев в образце мортмассы	Зольность отпада веток, %	Зольность опада листьев, %	Среднее значение зольности образцов мортмассы, %
T1 – автоморфные условия	28,0	72,0	0,40	1,2	2,95	2,08
T2 – трансаккумулятивные условия	12,0	88,0	0,14	1,06	2,48	1,77
T3 – трансаккумулятивные условия	37,0	63,0	0,59	1,07	2,46	1,76
T4 – аккумулятивные условия	10,8	89,2	0,12	3,93	6,09	5,01
T5 – аккумулятивно-полугидроморфные условия	21,0	79,0	0,27	2,05	4,75	3,39

условия) снижается способность улавливания элементов растениями, вследствие чего показатель зольности понижается до 1,8 % по сравнению с автоморфными условиями, где он составляет 2,1 %.

На территории ключевого участка именно для гребня структурной гряды с автоморфными условиями почвообразования характерен минимум факторов, влияющих на процессы накопления элементов растениями. Этому способствуют отсутствие на плакорном участке денудационных процессов, более глубокое залегание грунтовых вод, особенности механического состава почвы (формирование без склонового перераспределения твердой фазы) и минимальное перемещение фракций растительного опада и опада. Таким образом, на плакоре возможно определить объемы аккумуляции вещества (в целом и отдельных элементов), зависящие от минерального состава твердой фазы почвы и особенностей режима ее увлажнения. Именно здесь были организованы опадные установки, на которых велся сбор мортмассы, аккумулировавшейся как в воздушной, так и в водной среде — в аэробных и анаэробных условиях при застойном режиме увлажнения (общая сухая и влажная мортмасса). Образцы сухой и влажной мортмассы по видовой принадлежности листьев растений были идентичны, также они имели визуальную схожую степень разложения (селективные навески опада и опада с хорошей сохранностью веток и листьев). Это позволило уточнить соотношение фракций мортмассы (ветки, листья и их фрагменты), а также влияние условий разложения мортмассы (в воздушной и водной среде) на остаточную зольность (табл. 2).

Условия аккумуляции мортмассы влияют на скорость ее разложения и, соответственно, на высвобождение вещества в почву или водный раствор. На это указывает изменение зольности мортмассы, аккумулировавшейся в воздушной или водной среде. Проведенные сравнения показывают существенную потерю вещества (до 28 % от сухой селективной навески) при аккумуляции мортмассы в водной среде, т. е. происходит активная миграция элементов в водный раствор. При застойном водном режиме фрагменты опада веток разлагаются быстрее опада листьев и по сравнению с аккумуляцией в воздушной среде (соотношение масс в селективных мортмассах 0,67 и 0,75 соответственно). При устойчивой аэрации процесс разложения опада веток протекает медленнее, а опада листьев, напротив, быстрее (отношение масс золы общей мортмассы к массам золы сухого опада веток и сухого опада листьев).

Зольность опада листьев существенно выше зольности опада веток. Условия аккумуляции также влияют на зольность фракций мортмассы, в то время как зольность опада веток в сухих и влажных условиях остается одинаковой (в среднем 1,1 %), зольность опада листьев меняется — от 1,53 % в анаэробных условиях до 2,95 % в аэробных. При этом селективные навески (с хорошей сохранностью) опада веток и опада листьев из аэробных и анаэробных условий по значению зольности близки (1,0–1,1 и 1,7–1,8 % соответственно). Для листовой массы с сильной степенью разложения при аэробных условиях зольность составляет 2,95 %, при анаэробных — 1,53 % от массы сухого образца. Таким образом, на зольность опада листьев влияет степень их разложения, а также условия избыточного увлажнения, вследствие чего процесс миграции вещества из опада листьев ускоряется, снижая его зольность.

Для определения объемов вещества, мигрирующего из мортмассы, был проанализирован сухой остаток экстракции опада и опада, аккумулировавшегося в водной среде. Минерализация экстракта составила 1,775 г/л (сухой остаток), при этом 0,689 г/л — минеральная часть сухого остатка, остальное

Таблица 2

**Зольность растительной мортмассы (в целом и по фракциям)  
в зависимости от ее состояния (сухая/влажная)**

Объект исследования в автоморфных условиях (Г1)	Масса, г			Соотношение опада веток и опада листьев	Зольность, %		
	навески мортмассы	опада веток в навеске	опада листьев в навеске		веток	листьев	общей мортмассы
Сухая мортмасса (общая)	42,7	11,97	30,73	0,39	1,20	2,95	2,08
Влажная мортмасса (общая)	48,2	12,30	35,90	0,34	1,06	1,53	1,41
Сухая мортмасса (селективная)	29,9	10,30	19,60	0,52	1,00	1,79	1,39
Влажная мортмасса (селективная)	21,6	6,90	14,70	0,47	1,14	1,76	1,45

Таблица 3  
**Элементный состав сухого остатка  
 водной экстракции мортмассы (валовая форма),  
 г/кг**

Элемент	Концентрация	Элемент	Концентрация
Na	37,98836	Al	0,73333
K	17,16216	Fe	0,75247
Mg	3,23141	Ti	0,01102
Ca	4,97325	Mn	0,40567
Si	0,23842	Cu	97,13206
P	1,15136	Zn	0,16649
S	27,00761	Sr	0,05832
Cl	2,03790	Pb	0,01856

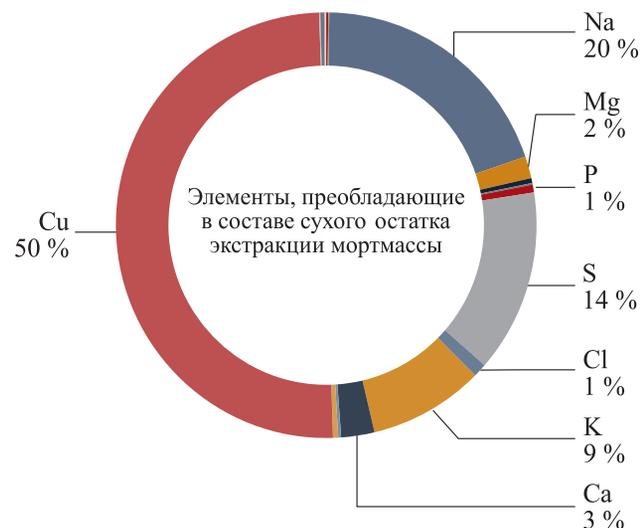


Рис. 2. Соотношение элементов, преобладающих в составе сухого остатка водной экстракции мортмассы.

приходится на органику. Поэлементный состав экстрагированной части мортмассы приведен в табл. 3, из данных которой следует, что среди элементов больше всего в сухом остатке содержится Cu (97 г/кг). В перерасчете на 1 м<sup>3</sup> раствора, экстрагирующего элементы из мортмассы в автоморфных условиях, на Cu может приходиться 194 г, Na — 76, S — 45, K — 34, Ca — 10, Mg — 6, Cl — 4, P — 2,2, Fe — 1,5, Al — 1,4 и В — до 1,1 г. Процентное соотношение преобладающих элементов приведено на рис. 2. При этом полученные показатели не позволяют оценить вклад отдельных органов растений в поступление элементов в водный раствор, но свидетельствуют о том, что из мортмассы при избыточном увлажнении наиболее активно мигрируют Cu, Na, S, K, Ca и Mg.

Вместе с тем следует отметить, что концентрации отдельных элементов, поступающих в органо-генные горизонты почв, при движении от автоморфных к аккумулятивным и полугидроморфным ландшафтным обстановкам не позволяют выявить четких закономерностей миграции (для Sr, Cu, Fe, Al, Ca, K, а также отчасти для Ti) и связаны, с наибольшей вероятностью, с литологическими особенностями территории и поступающим растительным опадом и отпадом. Кроме того, содержание Cu в валовой форме отмечено с многократным превышением показателей ПДК РФ [41, 42] (за единичным исключением) во всех исследованных образцах почв [43]. В то же время выявленные значения не превышают предельно допустимые концентрации тяжелых металлов по национальным стандартам Вьетнама [44].

Для уточнения путей поступления элементов (с отпадом веток или опадом листьев) было проведено сравнение содержания элементов в золе сухого и влажного отпада веток и опада листьев (табл. 4). На рис. 3 показано процентное соотношение основных элементов в составе золы сухого отпада и опада. Так, в составе золы последних, как и в сухом остатке водной экстракции мортмассы, преобладает Cu. В абсолютных значениях содержание Cu в отпаде веток значительно выше, чем в опаде листьев. Аналогичное распределение отмечается для P, Fe, Zn, Sr и Pb. Концентрации Cl и Al в абсолютных значениях, напротив, существенно больше в опаде листьев. Показатели содержания Na, K, Mg, S и Mn приблизительно равны.

В табл. 4 приведено содержание элементов во влажном отпаде веток и опаде листьев, а на рис. 4 — процентное соотношение преобладающих элементов. Очевидно определенное сходство по составу элементов в составе золы сухого (см. рис. 3) и влажного (см. рис. 4) отпада и опада, однако прослеживаются различия в соотношении содержания ряда элементов.

Нами было установлено, что в абсолютных значениях содержание Cu во влажном отпаде существенно выше, чем во влажном опаде. Аналогичное распределение отмечается для K, Mg, Ca, Si, Fe, Zn, Sr и Pb. Концентрации P, Mn и Al в абсолютных величинах, напротив, выше в опаде. Содержание Na, S, Cl и Ti в отпаде и опаде приблизительно одинаково. При этом содержание Na, K, Cl во влажном отпаде и опаде значительно ниже по сравнению с сухими, также отмечается небольшое уменьшение концентрации Ti. Кроме того, в отпаде уменьшается содержание P и Pb, а в опаде — Al. Происходит существенное увеличение концентрации Si и Mn (аккумуляция во влажной мортмассе).

Элементный состав золы сухого опада веток и опада листьев, влажного опада веток и опада листьев, золы зеленых веток и листьев (валовая форма), г/кг

Элемент	Зола					
	сухого опада веток	сухого опада листьев	влажного опада веток	влажного опада листьев	зеленых веток	зеленых листьев
Na	14,32317	16,30687	7,92967	8,86251	3,33631	14,71521
K	45,39225	51,1706	24,57425	19,49496	46,49797	111,69298
Mg	45,15594	43,98582	40,52916	33,06953	10,31847	25,90519
Ca	44,30505	31,60022	49,27367	35,17201	3,86528	11,46730
Si	0,38588	0,21663	3,54656	2,84317	0,31942	0,14044
P	25,66455	15,45538	12,81579	15,93132	5,88628	13,37629
S	37,38732	38,60477	38,85391	40,96023	35,53592	32,53464
Cl	0,022487	0,053705	0,084571	0,074250	0,04512	0,42401
Al	12,58128	38,16400	10,04494	14,35009	19,93673	11,28301
Fe	6,22976	2,94215	6,93532	5,35894	0,91767	1,29646
Ti	0,21227	0,015384	0,11899	0,10612	0,04962	0,08054
Mn	6,12156	6,86014	11,22131	12,55211	0,87972	4,15011
Cu	352,63619	185,83555	353,06357	199,16819	0,11763	0,22979
Zn	1,12739	0,53404	1,07656	0,7248	0,27238	0,30018
Sr	2,18020	1,04594	2,14613	1,31979	0,16486	0,32968
Pb	0,096396	0,01750	0,048521	0,032288	0,008493	0,006899

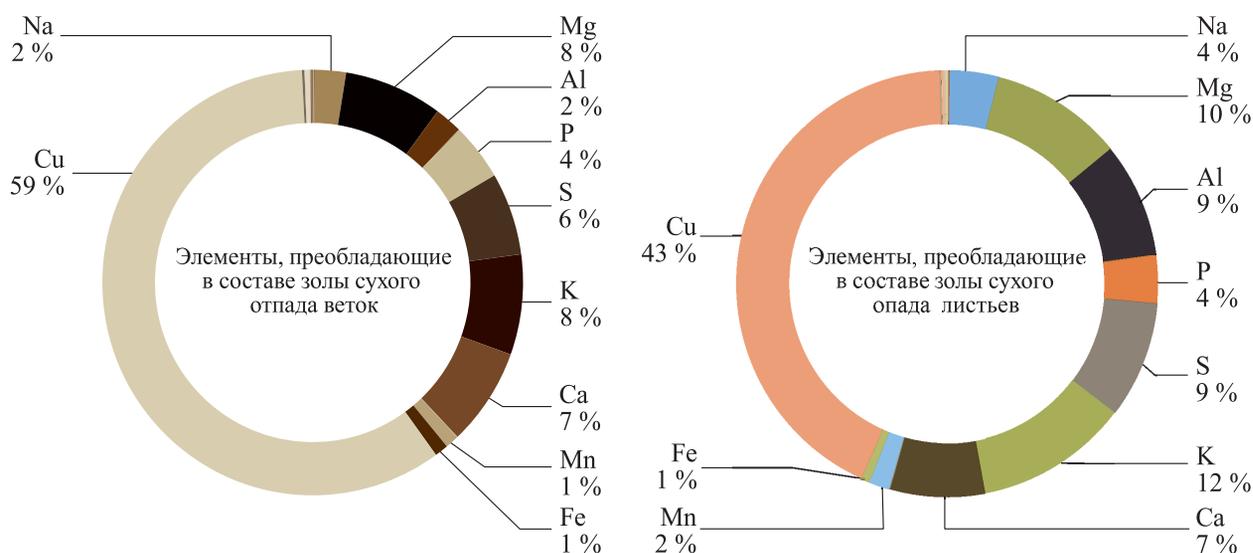


Рис. 3. Соотношение элементов, преобладающих в составе золы сухого опада веток и опада листьев.

Во влажном опаде возрастает содержание Fe (коагуляция с гумусовыми кислотами) и Pb. Содержание Mg, Ca, S, Cu, Zn и Sr не меняется. В связи с тем что соотношение элементов в составе влажного и сухого опада и опада лабильно, возникла необходимость в уточнении состава зольности листьев, хвои и веток зеленых растений как основного источника растительной мортмассы (см. табл. 4). Элементный состав зеленых растений позволяет выявить лабильные элементы, по отношению к которым происходит увеличение концентрации малоподвижных элементов в опаде и опаде.

На рис. 5 приведено процентное соотношение преобладающих элементов в составе золы зеленых веток и листьев. Элементный состав схож с составом сухого и влажного опада и опада, однако соотношение элементов существенно различается (см. табл. 4, см. рис. 5).

Сравнение содержания элементов во влажном и сухом опаде и в зеленых растениях дает возможность установить элементы, активно переходящие в водную экстракцию сразу после опадения.

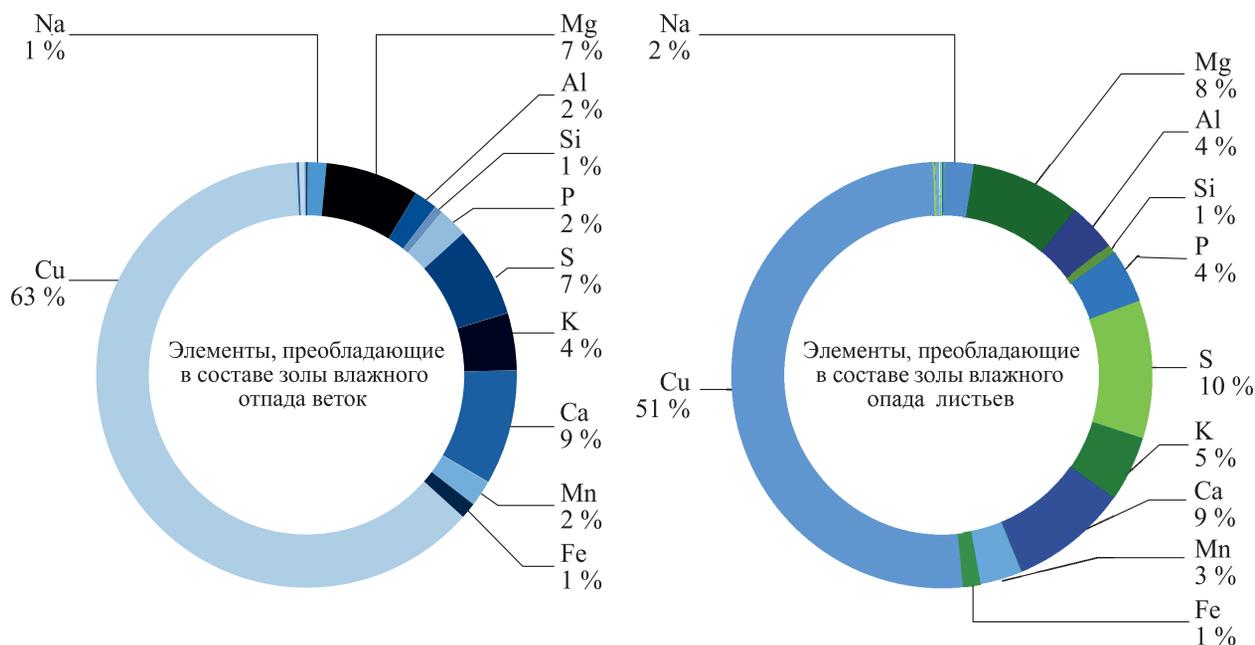


Рис. 4. Соотношение элементов, преобладающих в составе золы влажного опада веток и опада листьев.

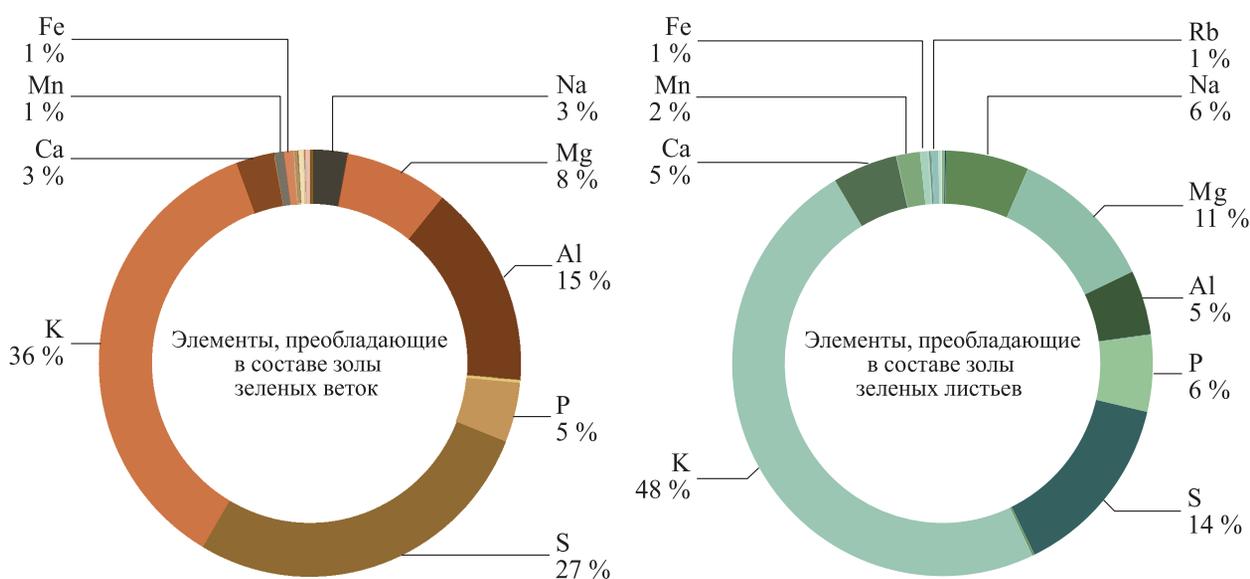


Рис. 5. Соотношение элементов, преобладающих в составе золы зеленых веток и листьев.

В составе зеленых веток и листьев преобладает К — 46,498 и 111,693 г/кг (максимум) соответственно. Содержание К в зеленых частях растений значительно выше, чем в опаде и опаде. Максимум содержания Si отмечен для зеленых листьев — 0,424 г/кг, в то время как в сухом и влажном опаде и опаде его содержание снижается (особенно в аэробных условиях), что указывает на активную миграцию Si. По сравнению с зелеными ветками и листьями активно вымывается из влажного опада Na, при этом в равной степени концентрируется в сухом опаде (14,323 г/кг) и опаде (16,307 г/кг), а также незначительно — во влажном опаде (7,929 г/кг). Концентрация Mg слабо меняется при увлажнении, максимальные значения отмечены для сухого опада и опада — 45,156 и 43,986 г/кг соответственно. Содержание Ca в сухом опаде и опаде — 44,305 и 31,600 г/кг соответственно. Содержание Si во влажном опаде и опаде — 3,547 и 2,843 г/кг соответственно. P активнее концентрируется в сухом опаде (25,665 г/кг). Содержание S почти не меняется от зеленых частей растений к опаду и

опалу, сформировавшихся в сухих и влажных условиях. Для металлов выявлены следующие особенности: Al и Ti преимущественно концентрируются в сухом опаде и опаде (38,164 и 12,581; 0,154 и 0,212 г/кг соответственно); Fe и Mn — во влажном опаде и опаде (6,935 и 5,359; 11,221 и 12,552 г/кг соответственно). Cu (входит в состав ферментов растений) и Zn концентрируются в равной степени как в сухом, так и во влажном опаде и опаде. Содержание Pb во влажном опаде — 0,032 г/кг, в сухом опаде — 0,096 г/кг.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К результатам исследований, проводимых в пределах соподчиненных ландшафтных фаций среднегорных тропических лесов Вьетнама, следует отнести выявление особенностей изменения аккумуляции и зольности растительного опада веток и опада листьев. Отмечается гравитационное смещение и перевевание опада листьев из автоморфных условий в пользу пологого трансаккумулятивного склона и, напротив, с крутого трансаккумулятивного склона в пользу аккумулятивных и полугидроморфных условий. Так, на пологом склоне, плакоре и в полугидроморфной низине на опад листьев приходится от 70–80 до 90 % массы, и соотношение опада веток к опаду листьев составляет 0,3–0,4 до 0,12–0,14 соответственно. На крутом склоне соотношение опада веток к опаду листьев увеличивается до 0,6, а масса фракции опада листьев снижается до 60 %.

При переходе от локаций автоморфных условий зольность опада веток и опада листьев снижается для трансаккумулятивных склонов и увеличивается к аккумулятивным и полугидроморфным локациям, достигая там максимальных значений. Таким образом, рельеф (подножие склона, аккумулятивные условия) и стабильное увлажнение (близость грунтовых вод) определяют для участков в основании склона максимальные значения зольности опада и опада. На крутых участках склона (трансаккумулятивные условия) снижается способность улавливания элементов растениями, вследствие чего показатель зольности снижается.

Таким образом, выявлены различия в накоплении зольных элементов в опаде и опаде, связанные с местонахождением в разных ландшафтных обстановках. Показано, что в зависимости от положения элементарной геохимической ландшафтной фации в катене меняется не только общая зольность опада и опада, но и соотношение зольности опада к опаду.

Проведенные исследования процесса разложения опада веток и опада листьев позволили установить их элементный состав, определить основные источники и условия вовлечения элементов в геохимическую миграцию (или аккумуляцию). Na, Mg в условиях увлажнения экстрагируют в водный раствор из опада веток и опада листьев, K (особенно при увлажнении) и Ca — из опада листьев, P (при увлажнении) и S (вне зависимости от увлажнения) — из опада веток. Cl поступает в раствор при разложении опада листьев. Для Si характерна аккумуляция в опаде веток и опаде листьев при увлажнении (вследствие вымывания прочих элементов из массы опада и опада). Al экстрагирует из опада веток и опада листьев при увлажнении, Fe — из опада веток, тогда как в условиях увлажнения концентрируется в опаде листьев. Ti поступает из опада веток и опада листьев при увлажнении, Mn и Cu в большей степени — из опада листьев (вне зависимости от увлажнения). Zn активнее поступает в водный раствор из опада веток при увлажнении, Pb — из опада веток в условиях увлажнения. Sg неактивно переходит в раствор из опада веток, концентрируется в опаде листьев.

Сравнение состава исследованных элементов зеленых частей растений с опадом и опадом показывает значительное содержание K, Na и Cl, что может говорить об их активной миграции в почвенные растворы непосредственно после опадания или снижения концентрации перед опаданием.

Проведенные исследования позволяют в дальнейшем проанализировать вклад разных частей растительного опада и опада (а также непосредственно зеленых веток и листьев) в процессы геохимической миграции вещества с учетом разных ландшафтно-геохимических обстановок и, основываясь на данных о вещественном составе сухого остатка экстракта мортмассы, оценить участие отдельных элементов в миграционных процессах, протекающих в горных тропических лесных ландшафтных фациях.

*Работа выполнена в рамках НИР Совместного Российско-Вьетнамского тропического научно-технологического центра по теме «Сохранение, восстановление и устойчивое использование тропических лесных экосистем на основе изучения их структурно-функциональной организации» (ЭКОЛАН Э–1.2), НИР Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН (121040100327–3, 121030300149–0) и при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лопес де Гереню В.О., Курбатова Ю.А., Курганова И.Н., Тиунов А.В., Аничкин А.Е., Мякшина Т.Н., Кузнецов А.Н. Суточная и сезонная динамика потока CO<sub>2</sub> из почв в различных древостоях муссонного тропического леса // Почвоведение. — 2011. — № 9. — С. 1074–1082.
2. Наумов В.Д. Почвы тропиков и субтропиков и их сельскохозяйственное использование. — М.: Изд-во Рос. гос. агр. ун-та — Моск. с.-х. акад. им. К.А. Тимирязева, 2010. — 361 с.
3. Нгуен Т.С. Химико-минералогическая характеристика основных типов почв Социалистической Республики Вьетнам. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. — С. 3–26.
4. Соколов И.А. Тропическое почвообразование и выветривание (на примере Лаоса). — М.: Изд-во Почв. ин-та им. В.В. Докучаева, 2004. — 376 с.
5. Фридланд В.М. Почвы и коры выветривания влажных тропиков. — М.: Наука, 1964. — 312 с.
6. Чергов О.Г. Экотопы дождевого тропического леса (на примере Вьетнама). — Л.: Наука, 1985. — 48 с.
7. Шишов Л.Л., Андроников С.В., Белобров В.П., Куленкамп А.Ю., Пантелеев Л.С., Соколов И.А., Шевченко Т.Н. Почвы переменного-влажных тропиков Лаоса и их рациональное использование. — М.: Изд-во Почв. ин-та им. В.В. Докучаева, 1996. — 275 с.
8. Eden T. Elements of Tropical Soil Science. — London: Macmillan, 1965. — P. 40–62.
9. Вальтер Г. Растительность земного шара. Т. 1. Тропические и субтропические зоны. — М.: Прогресс, 1968. — 551 с.
10. Walter H. Nährstoffgehalt des Bodes und natürliche Waldbestände // Forstliche Wochenschrift Silva. — 1936. — Vol. 24. — P. 201–213.
11. Горнунг М.Б. Постоянновлажные тропики: Изменение природной среды под воздействием хозяйственной деятельности. — М.: Мысль, 1984. — 239 с.
12. Кабанов Н.Е. Тропическая лесная растительность провинции Юньнань (КНР). — М.: Наука, 1971. — 183 с.
13. Ньюмен А. Легкие нашей планеты: Влажный тропический лес — наиболее угрожаемый биосенос на Земле / Пер. с англ. М. Исакова. — М.: Мир, 1989. — 336 с.
14. Ричардс П.У. Тропический дождевой лес / Пер. Т.П. Комова, Т.И. Подольской. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. — 460 с.
15. Уоллес А.Р. Тропическая природа. — М.: Мысль, 1975. — 223 с.
16. Федоров А.А. Влажнотропические леса Китая // Ботан. журн. — 1958. — Т. 43, вып. 10. — С. 1385–1409.
17. Тхай В.Т. Экология и классификация лесной растительности Вьетнама: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. — Л., 1962. — 44 с.
18. Thai V.T. Forest Tropical Ecosystems of Vietnam. — Hanoi: Science and Technique, 1999. — 298 p. (на вьетн. яз., резюме на франц. яз.).
19. Кузнецов А.Н. Структура и динамика муссонных тропических лесов Вьетнама: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. — М., 2015. — 52 с.
20. Кузнецов А.Н. Тропический диптерокарповый лес. — М.: ГЕОС, 2003. — 40 с.
21. Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П., Фан Л. Растительность горных массивов Би Дуп — Хон Ба — южной оконечности меридионального гималайского хребта Чыонг Шон // Материалы зоолого-ботанических исследований в горных массивах Би Дуп и Хон Ба, Далатское плато, Южный Вьетнам. — М.: Т-во науч. изданий КМК, 2006. — С. 9–115.
22. Golley F.V. Chemical plant-soil relationships in tropical forests // Journ. of Tropical Ecology. — 1986. — Vol. 2, Issue 3. — P. 226.
23. Нгуен В.Т., Окоделова А.А. Почвы биосферного заповедника Донг Най Южного Вьетнама // Естеств.-гуман. исследования. — 2015. — № 9 (3). — С. 6–14.
24. Samargoa L.A., Marques J.Jr., Barron V., Alleoni L.R.F., Pereira G.T., Bortoli Teixeira D. de, Souza Bahia A.S.R. de. Predicting potentially toxic elements in tropical soils from iron oxides, magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectra // Catena. — 2018. — Vol. 165. — P. 503–515.
25. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. — М.: Астрель, 1999. — 768 с.
26. Польшов В.Б. Избранные труды. — М.: Изд-во АН СССР, 1956. — 751 с.
27. Добровольский В.В. География микроэлементов: глобальное рассеяние. — М.: Мысль, 1983. — 272 с.
28. Самылина Е.В., Бирюков И.С. Анализ накопления тяжелых металлов в растительности (на примере Владимирской области) // Безопасность в техносфере. — 2013. — № 2. — С. 15–20.
29. Assessing Bioavailability of Soil Trace Elements // Trace Elements in Soils / Ed. P.S. Hooda. — Chippenham: Wiley, 2010. — P. 229–265.
30. Добровольский В.В. Тяжелые металлы: загрязнение окружающей среды и глобальная геохимия // Тяжелые металлы в окружающей среде. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. — С. 3–12.
31. Siem N.T., Phien T. Upland soils in Vietnam: Degradation and rehabilitation. — Hanoi, Vietnam: Agricultural Publishing House, 1999. — 412 p.
32. Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. — Л.: Наука, 1965. — 264 с.
33. Jordan C.F., Medina E. Ecosystem research in the tropics // Annals of the Missouri Botanical Garden. — 1977. — Vol. 64 (4). — P. 737–745.

34. Хай Н.С. Загрязнение почв и овощной продукции кадмием в условиях Ханойской области Вьетнама // Агротех. вестн. — 2006. — № 6. — С. 16–17.
35. Нгуен Т.Х., Косинова И.И. Оценка адсорбционных свойств почв провинции Донг Най (Вьетнам) // Науч. ведомости Белгор. ун-та. Сер. Естеств. науки. — 2019. — 43 (4). — С. 325–336.
36. Май Т.Л. Комплексная оценка почвы рисовых полей Вьетнама // Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2013. — № 3. — С. 68–75.
37. Май Т.Л., Воронина Л.П., Черемных Е.Г. Биотестирование почв рисовых полей Вьетнама // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Почвоведение. — 2014. — № 3. — С. 28–35.
38. Лебедев Я.О., Горбунов Р.В., Горбунова Т.Ю., Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П., Нгуен Т.В., Бобко Н.И., Капранов С.В. Некоторые особенности геохимических миграций в условиях соподчиненных ландшафтов среднегорных тропических лесов Южного Вьетнама // Тр. Карадаг. науч. станции им. Т.И. Вяземского — природного заповедника РАН. — 2019. — Вып. 3 (11). — С. 3–16.
39. 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 // Тр. Карадаг. науч. станции им. Т.И. Вяземского — природного заповедника РАН. — 2018. — Вып. 3 (7). — С. 43–67.
40. Федорова А.И., Никольская А.Н. Практикум по экологии и охране окружающей среды. — М.: Владос, 2001. — 228 с.
41. ГН 2.1.7.2041–06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. — М.: Федерал. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. — 15 с.
42. ГН 2.1.7.2042–06. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. — М.: Федерал. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. — 11 с.
43. Лебедев Я.О., Горбунов Р.В., Горбунова Т.Ю., Дрыгваль А.В., Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П. Почвенные и ландшафтно-геохимические условия горных тропических лесных экосистем Южного Вьетнама // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов: Материалы Всерос. науч.-практ. конференции (Екатеринбург, 22–24 апр. 2021 г.). — Екатеринбург, 2021. — С. 345–358.
44. QCVN 03:2008/VTNMT. National technical regulation on the allowable limits of heavy metals in the soils. — Hanoi, 2008. — 5 p. (на вьетн. яз.).

*Поступила в редакцию 20.08.2021*

*После доработки 09.03.2022*

*Принята к публикации 01.11.2022*