

---

---

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ, ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ  
И ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

---

---

УДК 550.4:911.5(597.253)

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МИГРАЦИЙ В  
УСЛОВИЯХ СОПОДЧИНЁННЫХ ЛАНДШАФТОВ СРЕДНЕГОРНЫХ  
ТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСОВ ЮЖНОГО ВЬЕТНАМА\***

**Лебедев Я.О.<sup>1</sup>, Горбунов Р.В.<sup>1,2,3</sup>, Горбунова Т.Ю.<sup>1,2,3</sup>, Кузнецов А.Н.<sup>2,3</sup>,  
Кузнецова С.П.<sup>2,3</sup>, Нгуен В.Т.<sup>2</sup>, Бобко Н.И.<sup>1</sup>, Капранов С.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,  
г. Севастополь, Российская Федерация

e-mail: [ya.o.lebedev@yandex.ru](mailto:ya.o.lebedev@yandex.ru), [karadag\\_station@mail.ru](mailto:karadag_station@mail.ru), [gorbunovatyu@gmail.com](mailto:gorbunovatyu@gmail.com),

<sup>2</sup>Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и  
технологический центр, г. Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам

<sup>3</sup>ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва,  
Российская Федерация, e-mail: [forestkuz@mail.ru](mailto:forestkuz@mail.ru)

В работе представлены результаты исследований вертикальной и горизонтальной (катенарной) миграции химических элементов в почвах среднегорных коренных тропических муссонных лесов. На базе заложенной катены в пределах локального склона структурной гряды выявлены закономерности смены почвенного покрова и геохимической миграции химических элементов в пределах всех типов элементарных геохимических ландшафтов – от автономных до аккумулятивных. Выявлено существование в почвах нескольких геохимических барьеров характерных для желтозёмов. Показано, что процессы выветривания в комплексе с иными экзогенными геоморфологическими процессами, характерными для рассматриваемой территории, оказывают значительное влияние на геохимические процессы в почвах, а степень их влияния на геохимические процессы зависит от положения элементарного геохимического ландшафта в катене.

**Ключевые слова:** геохимическая миграция, почвы, тропические леса, тяжёлые металлы, геохимическая катена, Вьетнам, национальный парк Бидуп-Нуйба.

### Введение

Почвенные геохимические процессы являются одним из путей массовой миграции вещества и его распределения в системе «растительность – почва – атмосфера». Особенности формирования почв определяются набором факторов, сопутствующих (или препятствующих) процессам геохимической миграции и перераспределения вещества в почвах, в связи чем возникают объективные сложности при выявлении причинно-следственных связей и констатации доминирующего влияния того или иного фактора. Исследование геохимических процессов является актуальной задачей для понимания функционирования системы «растительность–почва–атмосфера»

---

\* 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 (национальный парк Бидуп-Нуйба)», а также в рамках НИР ФИЦ ИнБЮМ «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

и биосферы в целом. В настоящее время за тропическими дождевыми лесами признается глобальная роль климатических и геохимических стабилизаторов биосферы (Чертов, 1985), в связи с чем возникает необходимость комплексного исследования взаимодействия всех элементов экотопа тропических дождевых лесов для чёткого понимания происходящих процессов и их последующего влияния на климат и геохимический круговорот веществ.

Вопросам классификации, морфологическим признакам и условиям развития зональных почв влажных тропиков посвящены многочисленные труды (Фридланд, 1964; Чертов, 1985; Шишов и др., 1996), в которых затрагиваются особенности почвообразования, связанные с высокой миграционной активностью, продиктованной специфическими климатическими условиями. Вопросы миграции вещества рассматриваются в работе В.О. Лопес де Гереню и соавторов (Лопес де Гереню и др., 2011), посвящённой исследованиям выделения CO<sub>2</sub> в атмосферу почвами различных биотопов.

Особенности миграции вещества и масс-энергопотоков в системе «растительность – почва – атмосфера» рассматриваются в работе А.В. Тиунова (2011) в рамках исследования экосистем муссонных лесов, однако работа посвящена в первую очередь растительным сообществам, структуре и сезонной динамике комплекса почвенной мезофауны, динамике поступления и деструкции растительного опада и микробной активности почвы.

Изменения физико-химических свойств тропических почв в пределах катен, расположенных, в первую очередь, в различных биотопах, описаны в работе И.А. Соколова (2004). Отличительные особенности физических свойств почв, развивающихся в пределах различных макроскульптур, представлены в работе А.Н. Кузнецова (2015). В публикации Р.В. Горбунова и соавторов (2018) рассмотрены особенности структуры и функционирования горных тропических ландшафтов, в том числе приведён физико-химический анализ почв, рассмотрены вертикальные миграции в пределах почвенных разрезов. Вопросы же, посвящённые миграции химических элементов в соподчинённых ландшафтах горных тропических лесов до сих пор остаются слабо разработанными.

В представляемой работе нами предпринимается попытка проследить геохимическую миграцию отдельных элементов (в том числе тяжелых металлов) как вертикальную по профилю, так и горизонтальную – посредством катены.

В связи с тем, что в условиях горной местности процессы почвообразования приобретают уникальные черты и усложняются процессами перераспределения вещества, которые, в свою очередь, зависят от множества факторов: степени увлажнения, растительности, крутизны склонов, механического состава, близости грунтовых вод и других, в целях изучения геохимических миграций, перераспределения вещества в соподчинённых ландшафтах и формирования представлений об особенностях процессов перераспределения вещества соподчинённых ландшафтах, было необходимо решить следующие задачи:

1) выбор наиболее подходящего маршрута катены, в рамках которого было бы максимально представлено разнообразие ландшафтных обстановок в пределах ландшафтно-экологического стационара;

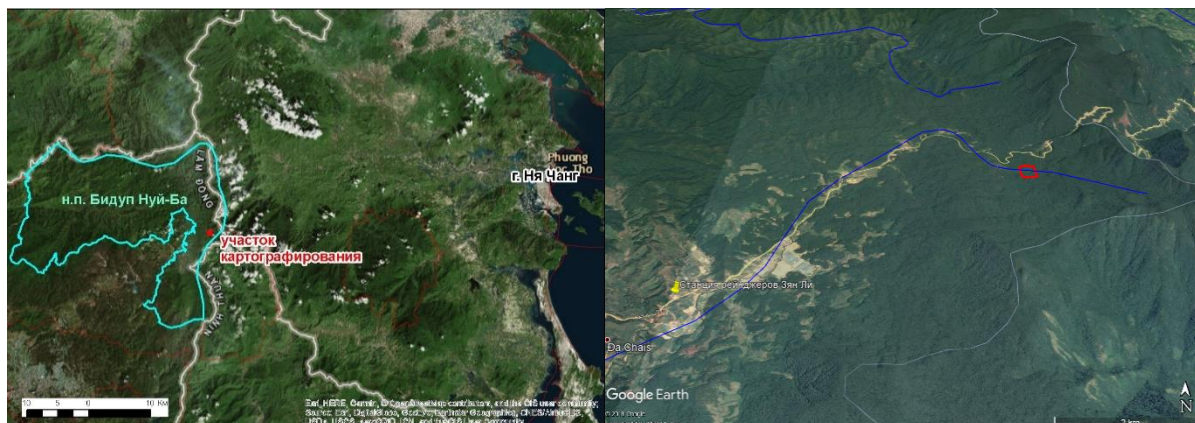
2) закладка, описание и типологическое определение почв, геохимический анализ отобранных образцов горизонтов почв;

3) выполнение лабораторных физико-химических анализов, в том числе на определение тяжёлых металлов.

4) Выявление особенностей процессов перераспределения вещества в соподчинённых ландшафтах в границах стационара.

## Материал и методы исследований

В Национальном парке Бидуп-Нуйба (провинция Ламдонг, Южный Вьетнам) был выбран ключевой участок леса (рис. 1), на котором проводились дальнейшие исследования.



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

Обоснование выбора территории для создания ландшафтно-экологического стационара приведено в предыдущих работах авторов (Котлов и др., 2018; Горбунов и др., 2018). Почвенные разрезы заложенной нами катены были приурочены к элементам структурно-денудационного рельефа – на вершине гряды, склоне структурной гряды, подошве склона. Один разрез был расположен у подножия склона на острове, образуемом периодическим водотоком, вследствие чего он может быть отнесён к структурно-флювиальному рельефу. Расположение почвенных разрезов наложено на схему генетических типов ландшафтов отображено на схеме (рис. 2). Определение элементов и тяжелых металлов в отобранных образцах производилось на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой PlasmaQuant MS Elite S-NR:11-6000ST043 на базе научно-образовательного центра коллективного пользования «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ.

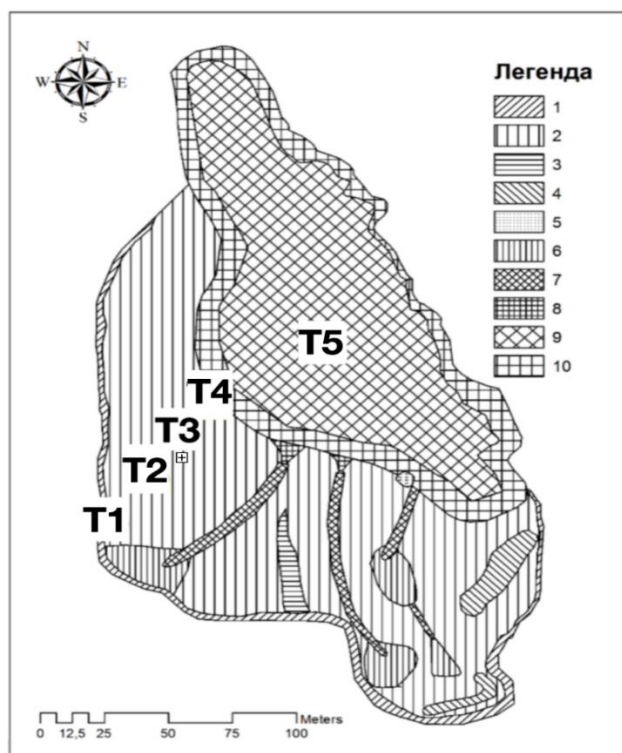
## Результаты и обсуждение

На геохимические процессы в почвах оказывают влияние разнообразные, протекающие параллельно, экзогенные процессы. Вследствие климатических особенностей территории, наиболее значимыми экзогенными, в т.ч. рельефообразующими процессами являются физическое и химическое выветривание, склонные процессы солифлюкционного и дефлюкционного смещения, а также долинные эрозионные процессы, деятельность которых не позволяет сформироваться мощному чехлу рыхлых отложений, особенно на склонах (Шишов и др., 1996). Так, например, точки Т3, Т4 характеризуются расположением на солифлюкционном склоне в транс-аккумулятивных и аккумулятивных условиях соответственно, в то время, как Т2 располагается в транс-аккумулятивных условиях на дефлюкционном склоне. Точка Т1 располагается в автоморфных условиях на вершине гряды, а Т5 расположена на острове у подножия гряды.

Описание исследованных почвенных разрезов представлено в таблицах 1–5, внешний вид разрезов представлен на рис. 3.

Почвенный профиль желтозёма маломощного оподзоленного супесчано-суглинистого лессивированного на каолиновой коре выветривания (Т1),

расположенный в автоморфных условиях, характеризуется закономерным уменьшением содержания тонкопесчаных частиц параллельно с увеличением содержания пылеватых частиц и общим уплотнением к минеральному горизонту. В данном разрезе также отмечается закономерная тенденция уплотнения почвы к минеральному горизонту вследствие лессиважа.



**Рис. 2.** Местоположение почвенных разрезов. Т1–Т5 – почвенные разрезы, генетические типы рельефа (Горбунов и др., 2018): *структурно-денудационный рельеф*: 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

**Таблица 1.**

**Желтозём маломощный оподзоленный супесчано-суглинистый лессивированный на каолиновой коре выветривания (Т1)**

Горизонт	Глубина (мощность)	Описание горизонта
Ао	(3 см)	опад листьев и желудей, хвои и шишек, веточек разной степени разложённости, свежий, рыхлый, граница ровная, переход резкий
At	0–12 см (12 см)	цвет 5YR1/3, рыхлый, свежий, оторфованный, бесструктурный, порошистый, сложение: слабо пластичное, не липкое, новообразований нет, включений нет, живая фаза: мелкие и средние корни растений D=0,1–10 см, граница ровная, переход резкий по цвету и механическому составу
A1	12–18 см, затёки до 40 см (6 см до 28 см)	цвет 5YR1/1, уплотнённый, свежий, средняя супесь, мелко- и среднекомковатый, сложение: не липкое, слабо пластичное, новообразований нет, включения: отмытые зёрна кварца, живая фаза: средние и крупные корни растений D=до 5 см, граница слабо волнистая, переход резкий по цвету
A2	18–22/25 см (4–7 см)	цвет 5YR6/1, сильно уплотнённый, свежий, средний суглинок, бесструктурный, сложение: не липкое, сильно пластичное, новообразования: жёлтые примазки, включений нет, живая фаза: единичные корни растений D=1 см, граница затёчная, переход резкий по цвету



Продолжение таблицы 1.

В	22/25–35/45 см (10–23 см)	цвет 7,5YR7/10, плотный, свежий, тяжёлый суглинок, крупноглыбистый и столбчатый, сложение: не липкое, пластичное, новообразований нет, включения: затёки гумуса до 40 см, живая фаза: единичные мелкие корни растений, граница волнистая, переход ясный по цвету
С	35/45–60 см (видимая 15–25 см)	цвет 7,5YR5/10, окраска неоднородная, плотный, свежий, тяжёлый суглинок, мелкокомковатый, сложение: липкое, слабо пластичное, новообразования: красные примазки, включений нет, живая фаза: единичные мелкие корни, граница и переход не прослеживаются

Таблица 2.

**Желтозём маломощный слабоподзоленный среднесуглинистый  
лессивированный на щебнисто-каменном делювии дацитов (Т2)**

Горизонт	Глубина (мощность)	Описание горизонта
Ао	(2 см)	листья и ветки разной степени разложённости, рыхлый, сухой, граница ровная, переход резкий
At	0–5 см (5 см)	цвет 7,5YR1/2, рыхлый, сухой, оторфованный, бесструктурный и порошистый, сложение: слабо липкое, не пластичное, новообразований нет, включений нет, живая фаза: многочисленные корни растений D=1 мм–1 см, граница слабоволнистая, переход ясный по цвету
A1	5–7/12 см (2–7 см)	цвет 7,5YR2/3, рыхлый, сухой, средняя супесь, мелкокомковатый и порошистый, сложение: липкое, не пластичное, новообразований нет, включений нет, живая фаза: многочисленные корни растений D=0,5–1 см, граница волнистая, переход резкий по цвету и механическому составу
AeB	7/12–25 см (13–18 см)	цвет 7,5YR4/6, уплотнённый, свежий, средняя супесь, мелкокомковатый, сложение: слабо липкое, слабо пластичное, новообразований нет, включения: многочисленная дресва D=5–7 мм, живая фаза: корни растений D=2–3 мм – 2 см, граница слабо волнистая, переход постепенный по механическому составу
BC	25–66 см (видимая 41 см)	цвет 7,5YR4/8, окраска неоднородная с красными примазками, сильно плотный, свежий, средний суглинок, мелко-, среднекомковатый, сложение: липкое, пластичное, новообразований нет, включения: многочисленная дресва красного и серого цвета D=5–7 мм единичные до 8 см, живая фаза: единичные корни растений D=1–2 мм, граница и переход не прослеживаются

Таблица 3.

**Желтозём маломощный супесчаный лессивированный на щебнисто-каменном  
делювии дацитов (Т3)**

Горизонт	Глубина (мощность)	Описание горизонта
Ао	(2 см)	листья разной степени разложённости, сухой, рыхлый, поверхность слабо волнистая, наклонная 40°, граница ровная, переход резкий
Ad	0–6/8 см (6–8 см)	цвет 7,5YR2/4, рыхлый, свежий, тяжелая супесь, мелко- и среднекомковатый, сложение: не липкое, не пластичное, новообразований нет, включения: многочисленные включения дресвы, живая фаза: многочисленные мелкие и средние корни растений D=3–5 мм, граница слабоволнистая, переход чёткий по цвету
AeB	6/8–31/45 см (23–37 см)	цвет 5YR5/10, окраска неоднородная из-за включений, сильно уплотнённый, свежий, лёгкий суглинок, мелко- и среднекомковатый, сложение: липкое, сильно пластичное, новообразований нет, включения: многочисленные крупные обломки дацитов, дресва D=3–5 см, живая фаза: немногочисленные крупные корни D=3–4 мм до 2 см, граница слабоволнистая, переход ясный по цвету и включениям
C1	31/45– 78/90 см (45–59 см)	цвет 2,5YR3/8, окраска неоднородная из-за включений, уплотнённый, свежий, тяжелая супесь, мелкокомковатый, сложение: сильно липкое, сильно пластичное, новообразования: тонкие плёнки Мп по трещинам дацитов, включения: многочисленные дресва, щебень, обломки плит дацитов D= до 45–50 см, живая фаза: единичные мелкие и средние корни D=2–5 мм, граница слабоволнистая, переход ясный по цвету

Продолжение таблицы 3.

C2	78/90– 118/126 см (28–48 см)	цвет 5YR5/8, окраска неоднородная из-за включений, уплотненный, свежий, лёгкий суглинок, мелкокомковатый, сложение: слабо липкое, пластичное, новообразования: тонкие плёнки Mn по трещинам дацитов, включения: многочисленные дресва D=2–4 мм, обломки плит и валунов дацитов D= до 15–20 см, живая фаза: мелкие корни D=2–3 мм, граница неровная, переход резкий по механическому составу
D	118/126–140 см (видимая 14–22 см)	дациты монолитного сложения, незначительная трещиноватость, граница и переход не прослеживаются

Таблица 4.

**Желтозём глееватый легкосуглинистый на делювии каолининовой коры  
выветривания (Т4)**

Горизонт	Глубина (мощность)	Описание горизонта
Ao	(2 см)	листья и ветки разной степени разложения, рыхлый, свежий, граница ровная, переход резкий
Ad	0–3 см (3 см)	цвет 7,5YR4/6, рыхлый, влажный, легкий суглинок, мелко- и среднекомковатый, сложение: липкое, сильно пластичное, новообразований нет, включений нет, живая фаза: многочисленные мелкие и средние корни растений, граница слабо волнистая, переход заметный по цвету и живой фазе
A	3–5/13 см (2–10 см)	цвет 7,5YR5/6, рыхлый, влажный, легкий суглинок, мелко- и среднекомковатый, сложение: сильно липкое, сильно пластичное, новообразований нет, включений нет, живая фаза: единичные корни растений D=2 мм–1,0 см, граница затёчная, переход заметный по цвету
AB	5/13 – 44/47 см (31–42 см)	цвет 7,5YR6/10, уплотненный, влажный, легкий суглинок, мелко- и среднекомковатый, сложение: сильно липкое, сильно пластичное, новообразований нет, включения: обломки угля D=1,0–1,5 см неясного происхождения, живая фаза: единичные корни растений D=1,0–1,5 см, граница волнистая, переход заметный по цвету
B	44/47–74/84 см (30–40 см)	цвет 7,5YR6/10, уплотненный, влажный, легкий/средний суглинок – более оглиненный, чем AB, ореховатый и мелкокомковатый, сложение: липкое, сильно пластичное, новообразований нет, включений нет, живая фаза: единичные корни растений D=2–4 мм, граница неровная, переход постепенный по плотности и механическому составу
Bg	74/84–150 см (66–76 см)	цвет 7,5YR5/10, окраска неравномерная с сизыми пятнами и красными примазками, уплотненный, влажный, средний суглинок, мелкоореховатый и мелкокомковатый, сложение: липкое, сильно пластичное, новообразования: следы оглеения, включений нет, живая фаза: единичные мелкие корни растений D=1–2 мм, граница слабо волнистая, переход резкий по цвету
G	150–161 см (видимая 11 см)	цвет 5BG7/1–5BG6/1, окраска неравномерная с красными и тёмно-рыжего цвета, плотный, влажный, средний суглинок, мелко- и среднеореховатый, сложение: сильно липкое, сильно пластичное, новообразования: мощное оглеение, включений нет, живая фаза: единичные корни растений D=2 мм, граница и переход не прослеживаются

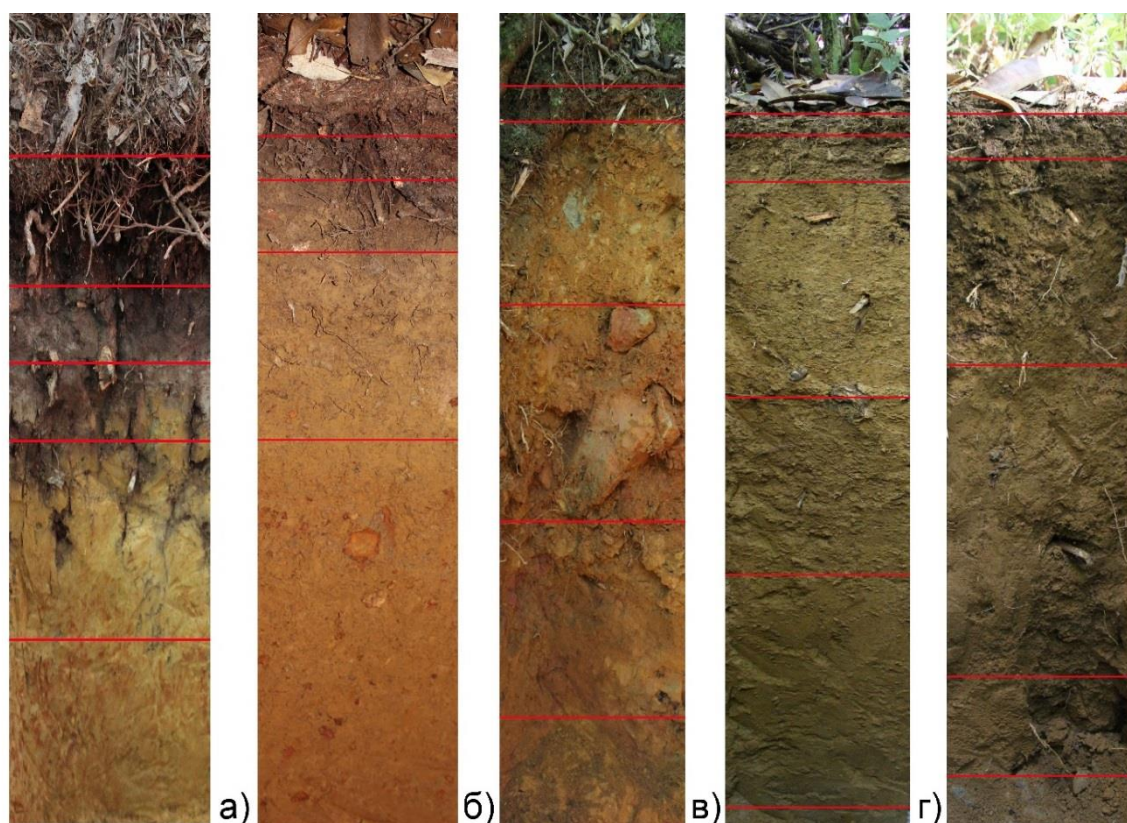
Таблица 5.

**Аллювиально-флювиальная легкосуглинистая почва на песчаном и галечниково-  
валунном аллювии дацитов, андезитов, туфов и песчаника (Т5)**

Горизонт	Глубина (мощность)	Описание горизонта
Ao	(2 см)	листья разной степени разложения, мокрый, рыхлый, граница ровная, переход резкий
Ad	0–5 см (5 см)	цвет 7,5YR4/6, свежий, рыхлый, легкий суглинок, мелко и среднекомковатый, сложение: липкое, пластичное, новообразований нет, включений нет, живая фаза: мелкие корни растений, граница неровная с затёком, переход заметный по цвету и живой фазе

Продолжение таблицы 5.

A1	5–20/32 см (15–27 см)	цвет 7,5YR5/8, свежий, рыхлый, легкий суглинок, мелко и среднекомковатый, сложение: пластичное, слабо-липкое, новообразования нет, включений нет, живая фаза: немногочисленные крупные корни (меньше, чем в Ad), граница неровная, переход слабо заметный по цвету затёков
B1	20/32–68 см (36–48 см)	цвет 7,5YR6/14, свежий, уплотнённый с увеличением плотности к нижней части горизонта, легкий суглинок, мелко и среднекомковатый, сложение: слабо липкое, сильно пластичное, новообразований нет, включения: мелкая дресва D=3–4 мм, живая фаза: немногочисленные корни растений D=5–6 мм, граница слабо волнистая, переход слабо заметный по механическому составу
B2	68–86 см (18 см)	цвет 7,5YR6/12, свежий, плотный, средний суглинок (сильно опесчаненный), мелкокомковатый, сложение: средне липкое, пластичное, новообразований нет, включения: многочисленные андезитовые средний песок и дресва, живая фаза: единичные корни D=5–6 мм, граница слабоволнистая, переход ясный по включениям
BC	86–88 см (видимая 2 см)	цвет 7,5YR6/12, свежий, плотный, средний суглинок (сильно опесчаненный), мелкокомковатый, сложение: средне липкое, пластичное, новообразований нет, включения: многочисленные андезитовые и красноцветные щебень и валуны D=до 10 см и более, живой фазы нет, граница и переход не прослеживаются



**Рис. 3.** Общий вид описываемых разрезов: а) желтозём маломощный оподзоленный супесчано-суглинистый лессивированный на каолиновой коре выветривания (Т1); б) желтозём маломощный слабооподзоленный среднесуглинистый лессивированный на щебнисто-каменном делювии дацитов (Т2); в) желтозём маломощный супесчаный лессивированный на щебнисто-каменном делювии дацитов (Т3); г) желтозём глееватый легко-суглинистый на делювии каолиновой коры выветривания (Т4); д) аллювиально-флювиальная легкосуглинистая почва на песчаном и галечниково-валунном аллювии дацитов, андезитов, туфов и песчаника. Красными линиями отмечены границы почвенных горизонтов (Т5)

Водопрочность агрегатов, при этом, уменьшается в обратной последовательности, что может быть объяснено уменьшением гумуса и Са, обеспечивающих прочность агрегатов, с глубиной. Вымывание гумуса и Са происходит во время обильных осадков, вследствие чего можно предположить, что процесс лессиважа и снижение водопрочности почвенных агрегатов зависят от этого напрямую. Как следствие, почва лёгкого механического состава имеет большую водопрочность по сравнению с почвами тяжёлого механического состава. Бесструктурность горизонтов At и A2 (как и образование горизонта A2) объясняется автоморфными условиями, исключая поступление вещества со склоновыми процессами и его вовлечение в почвообразовательные процессы.

Почвенный профиль желтозёма маломощного слабоподзоленного среднесуглинистого лессивированного на щебнисто-каменном делювии дацитов (T2), расположенный в транс-аккумулятивных условиях, также характеризуется закономерным уменьшением содержания тонкопесчаных частиц параллельно с увеличением содержания пылеватых частиц и общим уплотнением к минеральному горизонту. Вследствие процесса лессиважа происходит постепенное уплотнение почвенной массы к минеральному горизонту. Водопрочность горизонтов снижается от гумусового горизонта к минеральному. Содержание гумуса в большей степени влияет на водопрочность почвенных агрегатов, по сравнению с концентрацией Са, и вне зависимости от механического состава почвы.

Почвенный профиль желтозёма маломощного супесчаного лессивированного на щебнисто-каменном делювии дацитов (T3), расположенный в транс-аккумулятивных условиях, в нижней части склона структурной гряды, характеризуется формированием иллювиального горизонта, с незначительным накоплением глинистых частиц по сравнению с выше и ниже лежащими горизонтами. Транс-аккумулятивные условия осложняются существенным наклоном поверхности склона, в пределах которого был заложен почвенный разрез. Сохраняется закономерная тенденция уплотнения почвы к минеральному горизонту вследствие лессиважа. Водопрочность агрегатов уменьшается от гумусового горизонта к минеральному, и характерная не только для легкосуглинистого механического состава горизонта AeB, но и для тяжелосупесчаных гумусового Ad и минерального C1 (коагуляция гумусовых кислот Fe, высокое содержание Fe и Са). В основании разреза вскрываются плиты дацитов, над которыми залегает слой из их обломков. Предположительно, ниже по склону обломки дацитов могут находиться ближе к поверхности почв, однако данное предположение ещё не проверялось.

Почвенный профиль желтозёма глееватого легкосуглинистого на делювии каолиновой коры выветривания (T4), расположенный в аккумулятивно-транс-аккумулятивных условиях, также характеризуется увеличением плотности от гумусового горизонта к минеральному. Водопрочность почвенных агрегатов уменьшается вниз по профилю вследствие снижения аэрации с увеличением плотности к минеральным горизонтам (оглеенным), и связано с переходом в оглеенных горизонтах окисных форм железа в закисные. Процесс лессиважа выражен неявно вследствие поступления вещества в верхние горизонты со склоновыми процессами. Аллювиальные отложения, характерные для аллювиально-флювиальной легкосуглинистой почвы (T5) здесь вскрыты не были. Существенное оглинение оглеенных минеральных горизонтов позволяет предположить, что почва развивается на глинистой коре выветривания, выходы которой обычно приурочены к речным долинам и межгорным понижениям.

Почвенный профиль аллювиально-флювиальной легкосуглинистой почвы на песчаном и галечниково-валунном аллювии дацитов, андезитов, туфов и песчаника (T5) характеризуется уменьшением содержания тонкопесчаных частиц параллельно с увеличением содержания пылеватых частиц, увеличением количества включений и общим уплотнением к минеральному горизонту. Минеральный горизонт представлен



крупновалунно-галечниковым аллювиальным материалом неоднородного состава. Это объясняется его расположением на острове, граничащим с руслом постоянного водотока (реки). Выходы галечникового аллювия, пролювия отмечаются с обеих сторон северной оконечности острова. Почвенные агрегаты, несмотря на лёгкий состав, отличаются хорошей водопрочностью во всех горизонтах почвенного профиля.

Описание общих физико-химических характеристик желтозёмов исследуемого региона было дано нами ранее (Горбунов и др., 2018), выявленные закономерности касались размера и соотношения почвенных фракций: уменьшение содержания тонкопесчаных частиц к иллювиальному и минеральному горизонтам, параллельно с увеличением содержания пылеватых частиц в минеральном, а глинистых частиц – в иллювиальном горизонтах соответственно. Было отмечено снижение показателя рН от гумусового горизонта к минеральному; уменьшение ёмкости катионного обмена к аллювиальному горизонту и рост значения к минеральному горизонту и другие закономерности.

Процессы миграции вещества, в том числе тяжелых металлов, с одной стороны, являются следствием активно протекающих экзогенных процессов и гипергенеза горных пород, с другой стороны, являются причиной возникновения уникальных черт различных почвообразовательных процессов. Нами были выполнены определения тяжелых металлов (Mn, Cu, Zn, Sr, Pb), щелочных элементов, участвующих в агрегации (флокуляции) почвенных частиц (Mg, Ca, K), а также диагностически важные элементы желтозёмов (Si, Al, Fe, Ti). Результаты определений представлены в таблицах 6–10.

**Таблица 6.**

**Химические свойства желтозёма маломощного оподзоленного супесчано-суглинистого лессивированного на каолиновой коре выветривания (Т1)**

Горизонт	Элементы												
	pH H <sub>2</sub> O	K мг/кг	Mg мг/кг	Ca мг/кг	Si г/кг	Al г/кг	Fe г/кг	Ti мг/кг	Mn мг/кг	Cu мг/кг	Zn мг/кг	Sr мг/кг	Pb мг/кг
At	4,5	342,6	199,0	33,03	3,80	5,01	1,51	69,65	11,04	3,09	9,91	2,27	6,20
A1	5,1	404,0	2229,0	114,4	0,56	49,20	36,92	491,6	105,0	11,85	109,9	5,18	34,45
A2	4,9	179,5	170,0	23,49	0,24	14,22	2,64	20,46	12,30	1,39	12,01	2,36	18,91
B	5,8	628,2	354,0	3,20	1,69	32,35	30,85	17,57	15,14	5,38	12,81	3,49	50,91
C	6,7	893,2	262,0	0,86	8,16	25,87	27,77	4,90	38,32	11,41	19,91	4,43	62,61

**Таблица 7.**

**Химические свойства желтозёма маломощного среднесуглинистого слабооподзоленного лессивированного на щебнисто-каменном делювии дацитов (Т2)**

Горизонт	Элементы												
	pH H <sub>2</sub> O	K мг/кг	Mg мг/кг	Ca мг/кг	Si г/кг	Al г/кг	Fe г/кг	Ti мг/кг	Mn мг/кг	Cu мг/кг	Zn мг/кг	Sr мг/кг	Pb мг/кг
At	4,2	371,0	377,0	21,04	0,93	12,09	6,51	78,57	16,13	5,54	14,82	1,46	8,28
A1	5,6	242,0	206,0	17,01	1,44	43,64	28,19	180,1	17,74	5,35	11,86	1,52	11,73
AeB	6,7	472,6	226,0	129,6	0,91	52,29	45,72	106,2	11,70	7,93	31,31	2,24	12,65
BC	6,9	159,8	307,0	4,25	1,40	70,57	57,92	116,3	15,94	7,75	14,23	2,96	11,17

Расположение желтозёма маломощного оподзоленного супесчано-суглинистого лессивированного (Т1) в автоморфных условиях позволяет оценить распределение вещества по горизонтам в отсутствии влияния внешнего склонового привноса.

**Таблица 8.**  
**Химические свойства желтозёма маломощного супесчаного лессивированного на  
щебнисто-каменном делювии дацитов (Т3)**

Горизонт	Элементы												
	pH H <sub>2</sub> O	K мг/кг	Mg мг/кг	Ca мг/кг	Si г/кг	Al г/кг	Fe г/кг	Ti мг/кг	Mn мг/кг	Cu мг/кг	Zn мг/кг	Sr мг/кг	Pb мг/кг
Ad	5,6	511,1	708,0	26,47	0,78	69,86	47,00	475,4	27,86	19,46	18,61	1,97	16,75
AeB	5,7	1341,9	7160,0	1,98	2,84	92,15	54,42	687,4	109,3	39,72	35,09	1,35	17,13
C1	6,2	206,4	2323,0	11,69	0,51	85,88	116,0	582,8	183,4	43,07	28,11	4,75	27,71
C2	6,3	151,8	780,0	9,39	5,55	52,62	97,15	528,8	487,4	39,33	27,03	1,45	11,66
D	5,7	170,4	42070,0	0,00	1,68	126,6	108,6	1798,4	1232,9	40,70	174,2	7,20	5,93

**Таблица 9.**  
**Химические свойства желтозёма глееватого легкосуглинистого на делювии  
каолининовой коры выветривания (Т4)**

Горизонт	Элементы												
	pH H <sub>2</sub> O	K мг/кг	Mg мг/кг	Ca мг/кг	Si г/кг	Al г/кг	Fe г/кг	Ti мг/кг	Mn мг/кг	Cu мг/кг	Zn мг/кг	Sr мг/кг	Pb мг/кг
At	4,2	371,0	377,0	21,04	0,93	12,09	6,51	78,57	16,13	5,54	14,82	1,46	8,28
A1	5,6	242,0	206,0	17,01	1,44	43,64	28,19	180,1	17,74	5,35	11,86	1,52	11,73
AeB	6,7	472,6	226,0	129,6	0,91	52,29	45,72	106,2	11,70	7,93	31,31	2,24	12,65
BC	6,9	159,8	307,0	4,25	1,40	70,57	57,92	116,3	15,94	7,75	14,23	2,96	11,17

**Таблица 10.**  
**Химические свойства аллювиально-флювиальной легкосуглинистой почвы на  
песчаном и галечниково-валунном аллювии дацитов, андезитов, туфов и  
песчаника (Т5)**

Горизонт	Элементы												
	pH H <sub>2</sub> O	K мг/кг	Mg мг/кг	Ca мг/кг	Si г/кг	Al г/кг	Fe г/кг	Ti мг/кг	Mn г/кг	Cu мг/кг	Zn мг/кг	Sr мг/кг	Pb мг/кг
Ad	5,7	411,4	2099,0	105,7	0,93	49,76	38,98	471,4	245,6	11,34	79,64	5,25	38,10
A1	6,6	326,1	2274,0	93,72	12,19	58,63	44,61	593,1	195,6	10,80	98,09	5,62	45,33
B1	7,2	318,6	2669,0	53,16	12,69	58,78	48,61	550,7	270,1	13,21	129,1	4,89	45,86
B2	7,5	217,2	1542,0	32,86	0,81	56,99	48,18	405,0	224,2	9,35	63,53	3,97	32,63
BC	7,4	756,9	4819,0	109,3	1,97	73,82	47,48	559,5	403,0	15,08	133,1	4,60	53,52

Следует отметить, что изменение реакции почвенного раствора чётко коррелирует с соотношением K, Ca, Mg, Sr и Al, Fe, Zn – от слабокислой к нейтральной. С изменением механического состава горизонтов A1–A2 возникает сорбционный глинистый барьер, в результате чего происходит существенная аккумуляция всех, за исключением Si, элементов. Такое распределение Si (минимум в гумусовых (0,56 мг/кг) и увеличение к минеральным горизонтам (8,16 мг/кг)) отражает его вовлечение в биологический круговорот (Воронков, Кузнецов, 1984) (в данном случае – посредством хвойных растений) и последующее поступление с растительным опадом (горизонт At – 3,8 мг/кг). Из элювиального горизонта A2 происходит вынос вещества с накоплением в иллювиальном горизонте B и последующей закономерной миграцией в минеральный горизонт C – с увеличением (K – 832 мг/кг, Si – 8,16 г/кг, а также тяжелые металлы Mn –

38,32 мг/кг, Cu – 11,41 мг/кг, Zn – 19,91 мг/кг, Sr – 4,43 мг/кг, Pb – 62,61 мг/кг) или уменьшением концентрации (Ca-Mg, а также Al-Fe-Ti). Снижение концентрации содержания Ti по профилю и его пик в горизонте A1, вероятнее всего, являются следствием его продолжительной миграции (из автоморфных условий в транс-аккумулятивные вниз по склону), а также поступлением в гумусовые горизонты с растительным опадом. На продолжительную по времени суммарную миграцию может указывать уменьшение концентрации отдельных элементов в почве при движении от вершины к подножию гряды и следует оценивать по желтозёму маломощному среднесуглинистому лессивированному (T2) в рамках исследуемой катены. Полученные результаты демонстрируют закономерное распределение вещества при участии гравитационной воды и отсутствии поверхностного смыва и переноса вещества.

Почвенный разрез желтозёма маломощного среднесуглинистого лессивированного (T2) заложен в верхней части склона, ниже желтозёма маломощного оподзоленного супесчано-суглинистого лессивированного (T1) в транс-аккумулятивных условиях на полого-наклонном склоне структурной гряды. Результаты анализа профиля демонстрируют черты, свойственные почвам автоморфных и аккумулятивно-транс-аккумулятивных условий. Реакция среды почвенного раствора постепенно сменяется от кислой к нейтрально-слабо-щелочной. Al, Fe и Sr постепенно накапливаются с глубиной, в то время как остальные элементы имеют два пика концентрации. Первый пик связан с поступлением вещества с опадом и коагуляции гумусовых коллоидов – концентрация K (371 мг/кг), Mg (377 мг/кг) и Ca (21,04 мг/кг). Второй пик относится к механическому барьеру среднесупесчаного эллювиально-иллювиального горизонта AeB и среднесуглинистого минерального горизонта BC – K (472,6 мг/кг) и Ca (129,6 мг/кг), а также ряда тяжёлых металлов – Cu, Zn и Pb (7,93 мг/кг, 31,31 мг/кг и 12,65 мг/кг соответственно), Si, Ti, напротив, активно вымываются из эллювиально-иллювиального горизонта AeB в горизонт BC с концентрациями 1,4 г/кг и 116,3 мг/кг, соответственно. Концентрации Ti отражают тенденцию к поступлению в почву с опадом (78 мг/кг), концентрацию в гумусовом горизонте (180 мг/кг) и последующую миграцию вниз по профилю. По сравнению с желтозёмом маломощным оподзоленным супесчано-суглинистым лессивированным (T1) концентрация Ti в почве увеличилась, что, вероятнее всего, связано с его поступлением в результате склоновой миграции из автоморфных условий. Увеличением общей концентрации можно объяснить и возросшее поступление с опадом в горизонт At (78 мг/кг против 69 мг/кг), это утверждение справедливо для всех элементов, кроме Ca, Sr и Si, концентрация которых в горизонте At уменьшилась (21,04 против 33,03 мг/кг, 1,46 против 2,27 мг/кг и 0,93 против 2,8 г/кг, соответственно).

Транс-аккумулятивные условия желтозёма маломощного супесчаного лессивированного (T3), осложнённые существенным наклоном поверхности склона, приводят не только к миграции вещества вниз по почвенному профилю, но и к активной поверхностной миграции, на что указывают существенные «затёки» начиная от верхнего гумусового горизонта – по всем определяемым показателям по сравнению с расположенным выше разрезом желтозёма маломощного оподзоленного супесчано-суглинистого (T1). Нейтральная, в целом, реакция почвенного раствора, меняется на слабокислую в гумусовом горизонте (влияние органических кислот) и минеральном (материнская порода, скала) горизонте D (нейтральные, кислые дациты) – 5,6–5,7 соответственно. K и Ca, а также Mg сконцентрированы в гумусовых горизонтах Ad-AeB – 1341 мг/кг, 26,47 мг/кг и 7160 мг/кг соответственно, вследствие коагуляции гумусовых коллоидов кальцием, увеличением доли пылеватых частиц и накоплением K и Mg. В целом, поверхностный сток и накопление пылеватых частиц в верхнем горизонте могли привести к формированию механического барьера, на что косвенно указывает поведение K, слабо мигрирующего по профилю механически тяжёлых почв. Группа тяжёлых

металлов Mn, Cu, Zn, Pb имеют разные миграционные тренды – для Mn это постепенная концентрация к минеральному/коренному горизонту D (28–1233 мг/кг); остальные, в зависимости от механического состава в горизонтах C1–C2 – при переходе от тяжёлосупесчаного к лёгкосуглинистому – Cu постепенно накапливается к минеральным горизонтам (19–43 мг/кг), происходит снижение скорости миграции Zn (18–35 мг/кг) к иллювиальному горизонту с пиком к коренной породе, формируется механический барьер Pb (27 мг/кг) в тяжелосупесчаном горизонте C1 (против 11 мг/кг в C2), вследствие его низкой подвижности. Пик концентрации Mg, Ti, Mn, Al и Fe в минеральном/коренном горизонте D объясняется химическим составом дацитов, для которых характерно высокое содержание K, Mg (42070,0 мг/кг), Mn (1232,9 мг/кг), Ti (1798,4 мг/кг) – последний также выступает важным диагностическим элементом при выделении желтоземных почв.

Разрез желтозёма легкосуглинистого глееватого (Т4) расположен в аккумулятивно-транс-аккумулятивных условиях у подножия структурной гряды в долине реки. Реакция почвенного раствора меняется от нейтральной к слабощелочной, с возвратом к нейтральной в горизонте BG (что связано с окислительно-восстановительной реакцией  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ , а также значительным содержанием Al (93,17 г/кг)). Соединения гидрооксидов  $Fe^{3+}$ , находящиеся в почве в виде коллоидных растворов, существенно осложняют инфильтрацию воды в обоих направлениях. При этом отмечается переход соединений железа  $Fe^{2+}$  в форму соединений железа  $Fe^{3+}$  в результате аэрации горизонта BG, G в сухой период года, о чём свидетельствуют перемежающиеся сизые и красные примазки и пятна. Горизонт G, в целом, имеет более однородный сизо-серый цвет. Грунтовые воды находятся достаточно близко и могут влиять на ход почвообразования, однако судить об этом не представляется возможным в силу небольшой выборки разрезов, заложенных в аналогичных условиях. Разрез характеризуется постепенным уплотнением к минеральным горизонтам, однако сорбционного глинистого барьера, сопровождающего процессы оглинения, и в том числе оглеения, не наблюдается. Mg имеет тренд на увеличение концентрации к минеральным горизонтам, с максимум в горизонте G (3226,0 мг/кг). Близкие к этому значения наблюдались нами только в аллювиально-флювиальной легкосуглинистой почве (Т5), что наталкивает на мысль о схожих процессах формирования данных почв. Как уже отмечалось выше, высокие концентрации Ti, K, Mg и Mn обусловлены их содержанием в почвообразующих породах. Высокое суммарное содержание щелочных и щелочно-земельных элементов (K и Ca, Mg, Sr, соответственно) обуславливает нейтральную реакцию среды и снижает скорость миграции ряда тяжёлых металлов (Mn, Zn, Sr, Pb), что ведёт к их аккумуляции (Mn – 224,41 мг/кг; Zn – 143, 47 мг/кг; Pb – 40,86 мг/кг и т.д.). Концентрация K и Ca уменьшается в гумусовых горизонтах с глубиной (456,8–350,0 мг/кг и 136,16–74,43 мг/кг, соответственно), однако в связи с увеличением плотности минеральных горизонтов, концентрация K вновь возрастает (до 538,6 мг/кг). В целом, высокие концентрации исследованных элементов позволяют сделать вывод о значительной миграции вещества с последующим накоплением в аккумулятивно-транс-аккумулятивных и аккумулятивных обстановках, приуроченных к межгрядовому понижению в долине реки, к острову.

При анализе аллювиально-флювиальной легкосуглинистой почвы (Т5) выявлено, что реакция среды водного почвенного раствора меняется вниз по почвенному профилю от нейтральной до слабощелочной. Вместе с тем, аналогичный тренд имеют щелочные и щелочноземельные элементы (K и Ca, Mg, Sr, соответственно) – их концентрация постепенно снижается к минеральному горизонту, достигая там пика – 870 мг/кг для K+(Ca+Sr) и 4,8 г/кг для Mg. На фоне слабощелочной реакции минеральных горизонтов, слабокислая реакция является следствием поступления гумусовых кислот в гумусовые горизонты Ad, A1 – что было выявлено ранее (Горбунов и др., 2018). Равномерное распределение диагностических элементов Al, Fe, Ti указывает на их закономерно слабую миграцию по профилю. Значения Si имеют пик в горизонтах A1-B1, что,



вероятнее всего, является следствием привноса кремнезёма с аллювиально-флювиальными процессами. Для группы тяжелых металлов Mn, Cu, Zn, Pb, Sr возникает сорбционный гидроксидный барьер (Киреева, 2016) на уровне горизонта В2, причём Zn наряду с Al, Fe, Mn, в силу своей амфотерности, вовлекается в него, приводя к осаждению катионов Cu, Pb, Zn (и некоторых других тяжелых металлов) и накоплению в виде сложно- и малорастворимых соединений в нижележащем горизонте В2. Высокие концентрации Ti, K, Mg и Mn обусловлены их содержанием в химическом составе почвообразующих пород – дацитах нормального кислотного ряда.

### **Заключение**

Результатом проведённых исследований стали полученные наборы рядов данных о вещественном составе почв, развивающихся в различных ландшафтных обстановках и имеющие в связи с этим отличительные черты процессов геохимической миграции вещества. Анализ погоризонтного распределения выявил существование нескольких видов геохимических барьеров – механического, сорбционного глинистого, сорбционно-гидроксидного – свойственного изучаемым почвам. Вследствие процессов гипергенеза почва значительно обогащается рядом элементов, входящих в состав почвообразующих пород, в частности, дацитов (K, Mg, Mn, Ti), причём денудационные процессы способствуют попаданию обломков почвообразующих пород в верхние горизонты почв, формирующихся в транс-аккумулятивных обстановках. При определённых условиях, Zn, Al, Fe, Mn проявляют свойственную им амфотерность, запуская процесс сорбции элементов некоторых тяжелых металлов. Концентрации определяемых элементов существенно возрастают от почв, сформировавшихся в автоморфных условиях к почвам, сформированным в аккумулятивно-транс-аккумулятивных и аккумулятивных условиях; гумусовые горизонты автоморфных почв дают возможность исследовать приходную часть исследуемых элементов, поступающих с растительным опадом, исключая возможность влияния денудационных затёков.

### **Список литературы**

1. *Воронков М.Г., Кузнецов И.Г.* Кремний в живой природе. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 155.
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. – Вып. 3 (7). – С. 43–67.
3. *Киреева Т.А.* Гидрогеохимия. Конспект лекций. Учебно-методическое пособие. – М.: МГУ, 2016. – 197 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. *Кузнецов А.Н.* Структура и динамика муссонных тропических лесов Вьетнама, Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. – М.: Институт проблем экологии и эволюции животных им. А.Н. Северцова РАН, 2015. – 552 с.
6. *Лопес де Гереню В.О., Курбатова Ю.А., Курганова И.Н., Тиунов А.В., Аничкин А.Е., Мяхшина 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.
7. Соколов И.А. Тропическое почвообразование и выветривание (на примере Лаоса). – М.: РАСН, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2004. – 376 с.
  8. Тиунов А.В. (ред.) Структура и функции почвенного населения тропического муссонного леса (национальный парк Кат Тьен, Южный Вьетнам) – сборник статей. – М.: КМК, 2011. – 277 с.
  9. Фридланд В.М. Почвы и коры выветривания влажных тропиков (на примере Северного Вьетнама). – М.: Наука, 1964. – 312 с.
  10. Чертов О.Г. Экоотопы дождевого тропического леса (на прим. Вьетнама). – Ленинград: Наука, Ленингр. отд-ние, 1985. – 48 с.
  11. Шишов Л.Л., Андроников С.В., Белобров В.П., Куленкамн А.Ю., Пантелеев Л.С., Соколов И.А., Шевченко Т.Н. Почвы переменного-влажных тропиков Лаоса и их рациональное использование. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, РАСХН, 1996. – 275 с.

#### SOME GEOCHEMICAL MIGRATION PECULIARITIES IN TERMS OF THE INTERACTING LANDSCAPES OF THE MID-MOUNTAIN TROPICAL FORESTS IN SOUTHERN VIETNAM

Lebedev Ya.O.<sup>1</sup>, Gorbunov R.V.<sup>1,2,3</sup>, Gorbunova T.Yu.<sup>1,2,3</sup>, Kuznetsov A.N.<sup>2,3</sup>,  
Kuznetsova S.P.<sup>2,3</sup>, Nguyen V.T.<sup>2</sup>, Bobko N.I.<sup>1</sup>, Kapranov S.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation  
e-mail: [ya.o.lebedev@yandex.ru](mailto:ya.o.lebedev@yandex.ru), [karadag\\_station@mail.ru](mailto:karadag_station@mail.ru), [gorbunovatyu@gmail.com](mailto:gorbunovatyu@gmail.com),

<sup>2</sup>Russian-Vietnamese Tropical Center, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam

<sup>3</sup>A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Moscow, Russian Federation  
e-mail: [forestkuz@mail.ru](mailto:forestkuz@mail.ru)

The article presents the study results of vertical and horizontal (catenary) migration of chemical elements in mid-mountain indigenous tropical monsoon forests soils. The regularities of soil cover change and geochemical migration of chemical elements within all types of elementary geochemical landscapes (from autonomous to accumulative) are revealed on the basis of the laid catena within the local slope of the structural ridge. The existence of several geochemical barriers typical for yellow soils is revealed. It is shown that the weathering processes in conjunction with other exogenous geomorphological processes, that are typical for the studied area, have a significant impact on geochemical processes in the soils. Degree of their influence on geochemical processes depends on the position of elementary geochemical landscape in the catena.

**Keywords:** geochemical migration, soils, tropical forests, heavy metals, geochemical catena, Vietnam, Bidup-Nuiba National Park

Поступила в редакцию 27.09.2019 г.