

## Состав почвенных вод горно-лесных ландшафтов Верхней Усури и оценка выноса химических элементов

Надежда Константиновна Кожевникова<sup>✉</sup>, Анна Геннадьевна Болдескул<sup>2</sup>,

Татьяна Николаевна Луценко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН  
Владивосток, 690022, Российская Федерация

<sup>2</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН Владивосток, 690044,  
Российская Федерация

✉ Автор-корреспондент, e-mail: [nkozhevnikova@biosoil.ru](mailto:nkozhevnikova@biosoil.ru)

Получена 10 мая 2023 г.; принята к публикации 29 мая 2023 г.

**Аннотация.** Получены новые данные по содержанию и выносу химических элементов с почвенными водами растительных сообществ в бассейне верхнего течения р. Усури (на примере двух ручьёв). Показано, что воды, наиболее богатые элементами минерального питания растений, формируются в гумусовых горизонтах почв, развитых под ильмово-ясеневыми сообществами долинно-пойменных ландшафтов. Более 80% от содержания этих элементов закрепляется в почвенном профиле и расходуется на функционирование сообществ. Воды гумусовых горизонтов долинно-пойменных сообществ являются потенциальным источником поступления элементов в речные воды в периоды максимального выпадения осадков. Почвенные воды минеральных горизонтов склоновых ландшафтов хвойно-лиственных сообществ более кислые и выносят относительно высокие количества растворенного органического углерода, железа, алюминия и фосфора.

**Ключевые слова:** склоновые и долинно-пойменные ландшафты, почвенные воды, концентрации, оценка выноса химических элементов.

## Composition of soil water in mountain forest landscapes of the Upper Ussuri River and the estimation of export of chemical elements

Nadezhda K. Kozhevnikova<sup>✉</sup>, Anna G. Boldeskul<sup>2</sup>, Tatyana N. Lutsenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS,  
Vladivostok, 690022, Russian Federation

<sup>2</sup>Pacific Geographical Institute of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences  
Russia, Vladivostok, 690041, Russian Federation

✉ Corresponding author e-mail: [nkozhevnikova@biosoil.ru](mailto:nkozhevnikova@biosoil.ru)

Received 10 May 2023; accepted 29 May 2023

**Abstract.** This work provides new data on the concentrations and export of chemical elements with soil waters of various plant communities of slope and valley-floodplain landscapes in the basin of upper reaches of the Ussuri River. The data show that the most nutrient-rich waters are formed in humus horizons of soils developed under elm-ash communities of valley-floodplain landscapes. More than 80% of the content of these elements are accumulated in the soil profile and support the functioning of communities. The waters of humus horizons of valley-floodplain communities are a potential source of elements entering river waters during periods of maximum precipitation. Soil waters of the mineral horizons of slope under mixed coniferous-deciduous communities are more acidic and transport relatively high amounts of dissolved organic carbon, iron, aluminum and phosphorus.

**Key words:** slope and valley-floodplain landscapes, soil waters, concentrations, estimation of export of chemical elements.

### Введение

Понимание того, как структура водосбора влияет на гидрологию и гидрохимию поверхностных вод, остается на сегодняшний день важной исследовательской задачей. Для объективной оценки экологического состояния горных рек и ручьев,

являющихся ключевым звеном в цепи формирования количества и качества крупных водных объектов, необходима комплексная оценка их водосборов. Структурно-функциональная организация элементарных водосборов, определяющая интенсивность биологического круговорота, формирование миграционных потоков химических элементов и их вынос за пределы ландшафта, влияет, в конечном итоге, на геохимический тип речных вод (Аржанова, Елпатьевский 2005; Авессаломова и др. 2013).

Основная часть района исследований представлена коренными хвойно-лиственными лесами. Здесь отчетливо выделяются три контрастных пояса лесной растительности: пихтово-еловые, кедрово-еловые и широколиственно-кедровые леса.

Прибрежные зоны вдоль небольших ручьев и рек – важная часть общего ландшафта и участвуют в регулировании и переносе широкого спектра элементов в реки (Lidman et. al. 2017). В долинах горных рек Приморского края произрастают тополёво-чозениевые, ясеневые, ясенёво-ильмовые, ильмово-широколиственные леса; в большей части они пройдены рубками, имеют густой и разнообразный травяно-кустарничковый ярус, который играет заметную роль в круговороте веществ (Васильев 1977; Сапожников и др. 1993; Жильцов 2008). Фитомасса долинных широколиственных лесов накапливает более 180 кг/га зольных элементов и вовлекает в биологический круговорот огромное количество кальция, кремния, калия, натрия. На поверхность почвы с листовым опадом поступает более 95 кг/га зольных элементов, что вдвое больше, чем в хвойных лесах (Сапожников и др. 1993). Кроме того, горно-долинные почвы при значительном увлажнении являются вместилищем и местом транзита всех сконцентрированных склоновых подповерхностных вод. В относительно сухие периоды эти почвы, благодаря близкому расположению грунтовых вод, способствуют поддержанию достаточной водности рек (Жильцов 2008). Чередование процессов переувлажнения и относительного иссушения почв пойм и надпойменных террас создает предпосылки для формирования различных окислительно-восстановительных условий. Это обеспечивает своеобразную геохимическую обстановку по профилю почвы и определяет подвижность и дальнейшую миграцию ряда элементов (Костенков 1987). Согласно вышеназванным и другим литературным источникам, в долинно-пойменных ландшафтах ярко выражены такие биогеохимические процессы, как аммонификация, денитрификация, а также мобилизация, трансформация, осаждение и последующий вынос в реки растворённого органического углерода (РОУ) фосфора, алюминия, железа, марганца и др. Сведения о круговороте веществ в долинных лесах Приморского края весьма малочисленны. Это доказывает важность и необходимость исследований для понимания роли долинных лесов в регулировании и выносе широкого спектра элементов в водные экосистемы.

В ходе настоящих исследований решались следующие задачи: 1) изучение химического состава природных вод (дождевых, почвенных, речных) на примере двух контрастных бассейнов малых рек верховьев Уссури; 2) выполнение сравнительного анализа концентраций элементов в водах гумусового и минерального горизонтов почв различных растительных сообществ склоновых и долинно-пойменных ландшафтов; 3) оценка выноса химических элементов в составе почвенных и речных вод в течение теплого сезона.

### **Объекты и методы исследований**

Исследования проводились в бассейне реки Правая Соколовка (система верховьев р. Уссури), на площади которого (45 км<sup>2</sup>) расположен Верхнеуссурийский стационар Федерального научного центра биоразнообразия ДВО РАН (44° 01'35.3" N,

134° 12'59.8" E). По природным характеристикам ландшафты бассейна типичны для среднегорного пояса Южного Сихотэ-Алиня и представлены наиболее сохранившимися в регионе хвойно-широколиственными лесами. Долины ручьев и малых рек занимают около 5% водосборной площади и представлены смешанными хвойно-лиственными лесами. Долинно-пойменные леса, как и все коренные леса Сихотэ-Алиня, сложные по структуре, многоярусные, многовидовые. В их составе особенно заметно участие ясеня маньчжурского, ильма долинного, ольхи волосистой, березы (белой и желтой), нескольких видов кленов, ели аянской и кедра корейского (Сапожников и др. 1993).

Почвенный покров территории представлен, в основном, типичными буроземами разной степени оподзоленности и оглеения (Bugaets et al. 2021). Объекты исследования – почвенные воды, характеризующие наиболее распространенные в долинах р. Правая Соколовка и ее притоков, горно-долинные почвы (табл. 1), сформированные на речных песчано-галечниковых и делювиально-аллювиальных отложениях (Жильцов 2008; Bugaets et al. 2021). Гранулометрический состав делювия – средний пылевато-песчаный суглинок. В системе растительность–почва массообмен протекает интенсивно, что способствует значительному накоплению гумуса. Несмотря на высокую зольность листового опада, скорость и полноту его разложения, гумус долинных, как и других почв исследуемого бассейна, носит, как правило, выраженный фульватный характер, за исключением гумусовых горизонтов буроземов темных и типичных. По типу накопления гумусовых веществ почвы долинных широколиственных биогеоценозов Верхнеуссурийского стационара выделены в группу с аккумулятивно-кислым неагрессивным алюминий–феррум–кальциевым гумусонакоплением (Селиванова 1983).

Для выполнения поставленных задач в пределах устьевых участков ручьев Березовый и Медвежий Ключ были выбраны два профиля, в которых лесные сообщества крутых склонов речных долин сменялись местообитаниями в пределах плоского рельефа надпойменных террас (табл. 1). Ключевые участки этих речных бассейнов отличались сочетанием видов деревьев, подлеска, травяного напочвенного покрова и почв. Классификационная принадлежность почв ключевых участков установлена согласно почвенной карте района работ (Bugaets et al. 2021).

**Табл. 1.** Характеристика мониторинговых площадок.

**Table 1.** Characteristics of the monitoring sites.

Бассейн (ручей) Basin (stream)	Расположение по рельефу, высота над ур. м., м Relief location, height above sea level, m	Лесные сообщества Forest communities	Названия почвы* Soils name*
Медвежий Ключ Medvezhiy Klyuch	Средняя часть крутого северо-западного склона, 750	Елово-широколиственный лес с кедром и пихтой	Буроземы типичные
	Долина ручья, 2-я надпойменная терраса, 400	Разнотравно-кустарниковый ильмово-ясеневый лес	Аллювиальные серогумусовые (дерновые) типичные
Березовый Beryozovuyi	Средняя часть крутого западного склона, 700	Папоротниковый пихтово-еловый лес	Буроземы оподзоленные
	Долина ручья, 2-я надпойменная терраса, 500	Вторичный хвойно-лиственный лес	Буроземы типичные

\* Название почвы по современной классификации почв России (Шишов и др. 2004)

\* Soil name according to the modern classification of Russian soils (Shishov et al. 2004)

Наблюдения за химическим составом природных вод выполнялись в теплый сезон 2022 года (апрель–октябрь). Синхронный сбор вод производился на протяжении миграционного пути, включающего атмосферные осадки, почвенные и речные воды. Атмосферные выпадения собирались в химически нейтральные коллекторы, которые были установлены на поляне в 3–4 м от деревьев и построек и на 100–150 см выше поверхности почвы. Суммарно за сезон было отобрано 10 проб дождевых вод, включающих суточные и недельные суммы выпавших осадков. Почвенные воды под гумусовым и минеральным (40–50 см) горизонтами собирались на четырех площадках, занимающих различные позиции в ландшафте. Под почвенные горизонты устанавливались гравитационные лизиметры-планшеты. Вода из минеральных горизонтов горно-долинных почв извлекалась с использованием вакуумных лизиметров с керамическим наконечником. Отбор проб речных вод производился в замыкающем створе ручьев с одновременным измерением расходов (Болдескул и др. 2014). Всего было отобрано 62 пробы почвенных и речных вод.

Аналитическая обработка включала фильтрацию с помощью фильтров с размерами пор 0.45 мкм. Прошедшие через фильтр соединения рассматривались как сумма растворенных и коллоидных форм (Shulkin et al. 2022). Определение элементного состава выполнялось с учетом необходимых методических требований. Содержание микроэлементов (Fe, Al, Mn, Cu и Pb) и фосфора определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700 x (Agilent Techn., США) в центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН. Анализ макрокомпонентов выполнялся в Центре ландшафтной экодиагностики и ГИС-технологий ТИГ ДВО РАН. Содержание главных анионов ( $\text{Cl}$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ) определялось на жидкостном хроматографе Shimadzu LC10Avr, главных катионов (Ca, Mg, K, Na) – на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA 6800. Растворенный органический углерод (POУ) – с помощью ТОС-анализатора (Shimadzu ТОС-VCPN). В нефилтрованной пробе в день отбора определяли кислотность (pH) и содержание гидрокарбонат-иона по стандартной методике (Руководство по... 1977).

Поступление и вынос химических элементов рассчитывали как произведение концентрации химических элементов (в мг/л) на количество осадков (приход, мм) или слой стока (вынос, мм) за необходимый период. Слой воды, прошедший через гумусовый горизонт, был принят из расчета 45–50%, через минеральный – 20–35% от суммарного количества осадков (Аржанова, Елпатьевский 2005). Речной сток был рассчитан с применением кривых  $Q = f(H)$  на основании измеренных расходов ( $Q$ ) и уровней ( $H$ ) воды.

## Результаты и обсуждение

Основной количественный анализ был сфокусирован на элементах, имеющих важное значение для функционирования горно-лесных ландшафтов: POУ, азот в форме нитрат-иона ( $\text{N-NO}_3$ ), кальций, калий, алюминий (Al), железо (Fe), марганец (Mn), медь (Cu), фосфор (P). В круг обсуждаемых элементов были также включены сера сульфатов ( $\text{S-SO}_4$ ) и свинец (Pb), входящие в перечень приоритетных загрязняющих веществ (Ершов и др. 2019; Lukina et al. 2018).

**Характеристика дождевых вод.** Период с апреля по октябрь 2022 года был относительно влажный (табл. 2). За это время в виде дождя выпало 729 мм, средняя температура воздуха составила 13.7 °С. С мая по август осадки в течение месяца выпадали равномерно. В сентябре 80% от общего количества осадков пришлось на период прохождения тайфуна, когда суточное (6 сентября) количество осадков

**Табл. 2.** Метеорологическая характеристика исследуемой территории с 14 апреля по 9 октября 2022 года.

**Table 2.** Meteorological characteristics of the study area from April 14 to October 9, 2022.

Месяц Month	Средняя температура, °C Average temperature, °C	Влажность, % Humidity, %	Осадки, мм Precipitation, mm	Число дней с осадками Precipitation days
Апрель (April)	6.2	61.1	35.4	4
Май (May)	10.0	74.7	105.3	20
Июнь (June)	14.3	83.7	124.8	18
Июль (July)	20.0	89.1	168.0	17
Август (August)	17.3	89.3	115.8	20
Сентябрь (September)	12.7	84.3	177.6	9
Октябрь (October)	6.0	72.2	2.4	2

составило 133.8 мм. Состав дождевых вод – гидрокарбонатно-кальциевый. Их минерализация варьировала от 2 до 10 мг/л, а средняя величина составила  $5.14 \pm 2.40$  мг/л. Эти показатели близки к рассчитанным нами в предыдущие периоды исследования (Kozhevnikova et al. 2022) и сравнимы с полученными для заповедных территорий Российской Федерации (Свистов и др. 2015). Более 60% образцов дождевой воды характеризовались величиной pH, близкой к равновесному значению 5.6, а средневзвешенное значение за сезон составило 5.38. В период активной вегетации в дождях наблюдалось высокое содержание РОУ. В пробах, отобранных после продолжительного (4–7 дней) сухого периода в июле–августе, концентрации РОУ превышали 4 мг/л. Средневзвешенное значение РОУ за теплый период (2.96 мг/л) было сопоставимо с литературными данными (Iavorivska et al. 2016).

В табл. 3 отражено суммарное поступление элементов за исследуемый теплый сезон 2022 г. Диапазон ежемесячных выпадений РОУ составил 3–6 кг/га, суммы минеральных компонентов – от 6 до 11 кг/га. Поступление в составе атмосферных осадков серы (S-SO<sub>4</sub>) и азота (N-NO<sub>3</sub>) изменялось в течение сезона от 0.1 до 0.7 кг/га. Суммарно за сезон на водосборную площадь бассейна р. Правая Соколовка выпало примерно равное количество серы (S-SO<sub>4</sub>) и азота (N-NO<sub>3</sub>) – около 6 т. Эти показатели существенно ниже критических уровней, рассчитанных для бореальных лесов (Lukina et al. 2018). Среди микроэлементов, поступивших с дождевыми водами, стоит отметить превышение пороговых концентраций, найденных для пресных вод на основе многочисленных экспериментальных и натуральных данных (Moiseenko, Gashkina 2007), для Cu (в 1.5 раза) и Pb (в 4 раза). Поступления меди и свинца

**Табл. 3.** Поступление макро- и микроэлементов с дождевыми водами.

**Table 3.** Wet-deposition fluxes of macro and microelements.

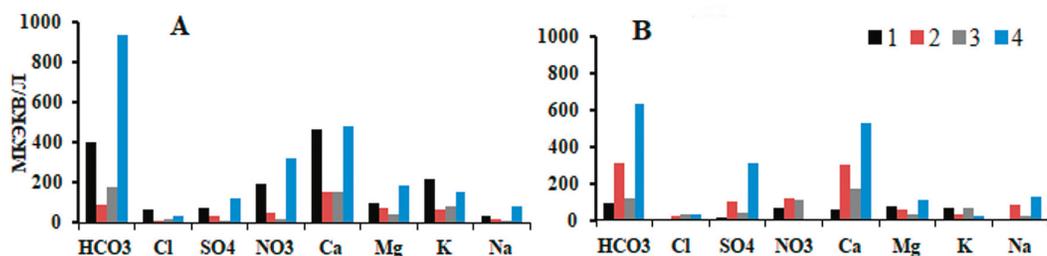
Элемент Element	Поступление, кг/га Wet-deposition, kg/ga	Элемент Element	Поступление, г/га Wet-deposition, g/ga
РОУ/ DOC	20.5	P	86.6
C-HCO <sub>3</sub>	3.7	Al	65.3
S-SO <sub>4</sub>	1.56	Fe	113
N-NO <sub>3</sub>	1.19	Mn	11.3
Ca	8.86	Cu	5.98
K	0.57	Pb	9.27

за исследуемый период (табл. 3) достигали нижнего уровня критических пределов, установленных для лесных ландшафтов (Lukina et al. 2018).

**Характеристика почвенных вод.** В долинах небольших ручьев, входящих в систему бассейна р. Правая Соколовка, преобладают лиственные древостой. Изреженность лесного полога способствует росту высокозольных кустарников и трав, а более высокие, чем в склоновых сообществах, влажность и температура воздуха обуславливают быструю трансформацию органического вещества и ускоряют гумусообразование (Селиванова 1983). Эти факторы способствуют развитию относительно мощного органогенного горизонта. В почвах под высокотравными ильмово-ясеневыми лесами в нижнем течении руч. Медвежий Ключ мощность гумусового горизонта варьирует от 7–10 до 15–20 см. Под смешанными мелкотравными сообществами надпойменных террас ручья Березовый, сформированными, преимущественно, тополем, ольхой, ильмом и разными видами берез и кленов, мощность горизонта не превышала 10–12 см.

**Содержание элементов в почвенных водах склоновых и долинно-пойменных ландшафтов.** Все исследованные почвенные воды по преобладающим ионам являются гидрокарбонатно-кальциевыми (рис. 1). По содержанию гидрокарбонатов в водах из-под гумусового горизонта (рис. 1А) лесные сообщества можно расположить в ряд: ильмово-ясеневые > пихтово-еловые > елово-широколиственные > вторичные хвойно-лиственные. В водах из-под минерального горизонта елово-широколиственных и вторичных хвойно-лиственных сообществ концентрация практически всех элементов увеличивается, а в пихтово-еловых – уменьшается в 2–9 раз (рис. 1В). В нижних почвенных горизонтах ильмово-ясеневых сообществ в воде увеличивается содержание сульфатов, кальция и натрия. Концентрации остальных макроэлементов составляют более 50% относительно их начального содержания в гумусовых водах (рис. 1В).

Анализ химического состава почвенных вод показал, что через гумусовый горизонт долинных биогеоценозов фильтруются наиболее минерализованные растворы. Самые высокие концентрации практически всех исследуемых элементов и ионов выявлены в водах гумусовых горизонтов ильмово-ясеневых сообществ. Исключением было содержание иона калия и марганца (рис. 1А, табл. 4), концентрации которых в водах из-под гумусового горизонта пихтово-еловых сообществ превышали остальные в 3–6 раз. Среднее содержание общего фосфора в водах ильмово-



**Рис. 1.** Содержание основных ионов (мкэкв/л) в почвенных водах гумусового (А) и минерального (В) горизонтов исследуемых лесных сообществ (1 – пихтово-еловые; 2 – вторичные хвойно-лиственные; 3 – елово-широколиственные; 4 – ильмово-ясеневые).

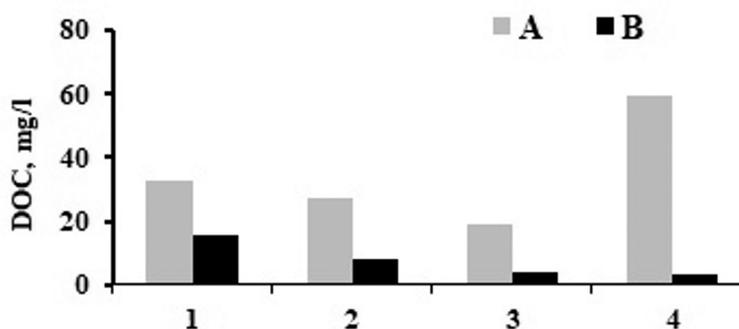
**Fig. 1.** The content of macroelements (µeq/l) in soil waters of humic (A) and mineral (B) horizons of the forest community under study (1 – fir-spruce; 2 – secondary coniferous-deciduous; 3 – spruce-broad-leaved; 4 – elm-ash).

**Табл. 4.** Средневзвешенные концентрации фосфора и микроэлементов (мкг/л) в почвенных водах гумусового и минерального горизонтов исследуемых лесных сообществ.

**Table 4.** Weighted average concentrations of phosphorus and microelements ( $\mu\text{g/l}$ ) in soil waters of the humus and mineral horizons of the studied forest communities.

Элемент Element	Склоновые Slope		Долинно-пойменные Valley-floodplain	
	гумусовый humus	Минеральный mineral	гумусовый humus	минеральный mineral
Руч. Березовый / Beryozovyi Stream				
P	168	224	102	22.5
Al	217	417	233	93.3
Fe	102	125	140	48.9
Mn	46.0	48.3	9.12	3.05
Cu	1.33	1.03	1.17	1.5
Pb	0.32	0.41	0.37	0.31
Руч. Медвежий Ключ / Medvezhiy Klyuch Stream				
P	68.0	170	1600	14.2
Al	203	215	190	17.1
Fe	110	121	285	4.1
Mn	1.78	3.87	16.9	32.1
Cu	1.0	0.81	7.9	1.0
Pb	0.24	0.87	0.33	1.7

ясеновых сообществ было в десятки раз выше, чем в водах всех остальных (табл. 4). Распределение растворимого органического углерода в водах верхних горизонтов почв исследуемых лесных сообществ имело сходные с гидрокарбонатами тенденции (рис. 1А, рис. 2). Одним из факторов высоких концентраций РОУ в водах гумусового горизонта ильмово-ясеновых сообществ может быть участие в их составе ясеня маньчжурского, свежий опад которого включает более 8% растворимых органических соединений. Это максимальное количество по сравнению с содержаниями РОУ



**Рис. 2.** Средняя концентрация растворенного органического углерода (РОУ, мг/л) в водах гумусового (А) и минерального (В) горизонтов почв лесных сообществ склоновых и долинно-пойменных ландшафтов в бассейне ручьев Березовый (1, 2) и Медвежий Ключ (3, 4).

**Fig. 2.** Dissolved organic carbon average concentration (DOC, mg/l) in the humic (A) and mineral (B) horizons soil water of the forest communities of slope and valley-floodplain landscapes in the Beryozovyi (1, 2) and Medvezhiy Klyuch (3, 4) stream basins.

в опаде таких пород, как ель аянская (4.8%), кедр корейский (2.6%), пихта белокорая (2.3%) (Сапожников 1972).

После фильтрации через иллювиальный горизонт максимальные изменения концентраций практически всех анализируемых элементов происходят в водах почв ильмово-ясеневых сообществ. Особенно заметно снижение РОУ, фосфора, калия и нитратов (рис. 1В, 2, табл. 4).

Практически весь нитратный азот и более 80% других элементов питания на пути от гумусового горизонта к минеральному, вероятнее всего, потребляются растительностью, утилизируются почвенной микрофлорой и/или закрепляются в гумусовых соединениях. В водах минеральных горизонтов почв вторичных хвойно-лиственных сообществ (долина руч. Березовый) выявлено увеличение растворенных форм нитратного азота, а под расположенными выше по склону почвами пихтово-еловых сообществ – общего фосфора, железа, алюминия и марганца. Концентрация РОУ в водах минеральных горизонтов снижается на 70–80%, но остается более высокой, чем в водах почв сообществ бассейна руч. Медвежий Ключ (табл. 1). В водах минеральных горизонтов пихтово-еловых лесов наблюдается увеличение с глубиной концентраций Fe, Al, Mn, здесь же отмечается наиболее высокое содержание РОУ среди всех исследованных вод минеральных горизонтов, (табл. 4, рис. 2). Fe и Al могут быть связаны в комплексы с РОУ, который также является фактором роста кислотности растворов, что способствует повышению подвижности этих элементов (Аржанова, Елпатьевский 2005; Lukina et al. 2018). Снижение концентраций растворимых форм Fe и Al в минеральных горизонтах других сообществ может быть обусловлено переходом их истинно растворимых форм в коллоидное состояние. Согласно другим исследованиям доля взвешенных форм Fe, Mn, Al в процессе внутрипочвенного переноса возрастает с глубиной и максимальна (50–80%) для железа (Елпатьевский 1993).

**Вынос элементов с почвенными водами.** С целью оценки влияния почв на состав речного стока была рассчитана величина выноса рассматриваемых химических элементов с почвенными водами (табл. 5). Как уже было отмечено ранее, изменения состава лизиметрических вод в процессе миграции от верхних к срединным почвенным горизонтам наиболее заметны в долинно-пойменных ландшафтах нижнего течения руч. Медвежий Ключ. В периоды выпадения интенсивных дождей с 1 га площади, занятой ильмово-ясеневыми лесами, с водами гумусового горизонта выносятся 3–14 кг нитратного азота ( $N-NO_3$ ), 38–80 кг РОУ, более 5 кг фосфора и около 0.2 кг железа и алюминия. В сумме в течение теплого периода за пределы гумусового горизонта вышеупомянутых сообществ долины руч. Медвежий Ключ было вынесено в 10–30 раз больше нитратов, общего фосфора, марганца и меди, остальных элементов – в 2–8 раз больше, чем на склоне (табл. 3). Ниже 40–50-см слоя поступало 30–72% от выщелачиваемых из гумусового горизонта почв кальция, марганца, меди и свинца (табл. 5).

В ходе сравнения выноса элементов из минеральных горизонтов почв обоих надпойменных террас особенно видна разница между содержанием в водах РОУ, нитратного азота и важных литофильных элементов – Fe и Al. Концентрации РОУ, Fe и Al в водах ручья были несколько выше, чем в водах минеральных горизонтов почв, как на склонах, так и в пойменных участках. Это позволяет предположить, что решающее влияние на качество воды в ручье оказывает поступление элементов с растворами преимущественно верхних почвенных горизонтов в периоды интенсивных дождей. В условиях часто затапливаемых в паводковые периоды почв широколиственных ильмово-ясеневых лесов, возможно восстановление Fe(III) до более

**Табл. 5.** Вынос химических элементов (кг/га) с речным стоком, водами гумусового и минерального горизонтов почв склоновых и долинно-пойменных ландшафтов.

**Table 5.** Export of chemical elements (kg/ha) with river runoff, waters of the humus and mineral horizons of soils of slope and valley-floodplain landscapes.

Элемент Element	Склоновые Slope		Долинно-пойменные Valley-floodplain		Речные воды River water
	гумусовый humus	минеральный mineral	гумусовый humus	минеральный mineral	
Руч. Березовый / Beryozovyi Stream					
POY/DOC	108	24.7	89.2	13.2	8.35
N-NO <sub>3</sub>	5.32	1.85	3.07	3.47	2.18
S-SO <sub>4</sub>	3.17	0.69	1.10	2.58	4.10
Ca	20.0	2.0	8.14	6.86	9.87
K	24.0	4.40	6.76	2.22	1.78
P	0.55	0.360	0.335	0.036	0.023
Al	0.712	0.668	0.764	0.150	0.129
Fe	0.334	0.201	0.459	0.078	0.067
Mn	0.152	0.077	0.030	0.005	0.002
Cu	0.004	0.002	0.004	0.002	0.001
Pb	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Руч. Медвежий Ключ / Medvezhiy Klyuch Stream					
POY/DOC	63.6	17.3	199	4.34	12.1
N-NO <sub>3</sub>	0.50	4.36	10.1	0.01	1.25
S-SO <sub>4</sub>	0.70	1.07	6.29	6.83	5.78
Ca	9.81	5.56	28.3	15.1	21.4
K	9.43	4.24	19.7	0.61	1.07
P	0.223	0.027	5.66	0.019	0.066
Al	0.665	0.345	0.615	0.022	0.301
Fe	0.362	0.195	0.925	0.005	0.236
Mn	0.006	0.006	0.058	0.042	0.005
Cu	0.003	0.001	0.028	0.001	0.003
Pb	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001

подвижного Fe(II). Вероятно, протекающие в результате постоянного переувлажнения окислительно-восстановительные реакции, вымывание из почв, склонов и надпойменных террас органических веществ, определяющих повышение кислотности речной воды (Кожевникова и др. 2022), а также другие процессы, могут выступать факторами высокой вариабельности (от 8 до 450 мкг/л) растворимых (< 0.45мкм) форм железа и алюминия в руч. Медвежий Ключ.

В водах нижних горизонтов долинных почв сообществ вторичных хвойных лесов (руч. Березовый) концентрации и вынос таких элементов, как азот в нитратной форме, сера в форме сульфатов и кальций значительно выше по сравнению с пихтово-еловыми сообществами (рис. 1, табл. 5). Причиной этого может быть мобилизация элементов в раствор из почв и подстилающих пород. Масштабы миграции остальных элементов неоднозначны. Максимально резкое снижение выноса POY наблюдается в почвах сообществ долинно-пойменных ландшафтов обоих бассейнов. При этом в этих же позициях идет уменьшение выноса с глубиной Fe и Al, что свидетельствует об их аккумуляции в почвенном профиле. В почвах склоновых сообществ вынос POY, Fe и Al снижается с глубиной незначительно, так как эти позиции заняты хвойными

лесами, что является причиной большей кислотности почвенных вод и подвижности рассматриваемых элементов (Аржанова, Елпатьевский 2005; Луценко и др. 2021).

В пойменных почвах сообществ вторичных хвойных лесов по сравнению с ильмово-ясеневыми прослеживается более интенсивная миграция и вынос растворенных форм РОУ, Fe и Al из минеральных горизонтов почв. Фактором резкого падения концентраций и выноса РОУ, и связанных с ним в комплексы Fe и Al в почвах ильмово-ясеневых сообществ, возможно, являются процессы их осаждения и сорбции на поверхности гидроксидов Fe и Al почвенных минералов (Kalbitz et al. 2000). Для этих процессов важное значение имеет скорость водообмена, определяемая рельефом (Перельман 1989), поэтому аккумуляция РОУ, Fe и Al в склоновых позициях ландшафтов менее выражена.

В почвенных водах минеральных горизонтов вторичных хвойных лесов (руч. Березовый) по сравнению с таковыми ильмово-ясеневых сообществ (руч. Медвежий Ключ), содержание РОУ выше в три, а N-NO<sub>3</sub> – в триста раз. Это может быть вызвано действием восстановительных процессов, приводящих к снижению содержания (концентрации) нитратов. В течение летне-осеннего сезона с водами минерального горизонта этих почв выносятся от 3 до 5 кг/га РОУ, от 1 до 1.5 кг/га нитратного азота. Возможно, вынос такого количества РОУ и азота обеспечивает поддержание более выраженного, синхронного с РОУ, переноса Al и Fe из почв в поверхностные воды. Это обуславливает стабильно высокие концентрации растворенных форм алюминия и железа в водах руч. Березовый в течение всего теплого сезона. Важна также роль почв надпойменных террас ручья в регулировании нитратов, вынос которых с водами ручья составляет более 60% от поставляемых из почв прибрежных зон (табл. 5). Рост концентрации нитратов в нижних горизонтах лесных почв часто сопровождается увеличением содержания растворенного алюминия (Maitat et al. 2000). В районе настоящих исследований была установлена достоверная значимая корреляционная связь между содержанием алюминия и нитратного азота в речной воде (Кожевникова и др. 2022).

### **Заключение**

Сравнительный анализ содержания и выноса химических компонентов с почвенными водами склоновых и долинных ландшафтов показал, что лесные сообщества последних биогеохимически более активны и могут оказывать повышенное влияние на величину выноса растворенных веществ в речные воды в периоды высокой водности. Полученные результаты свидетельствуют, что наиболее минерализованные растворы выносятся из гумусового горизонта почв, развитых под ильмово-ясеневыми сообществами. Для них характерны наиболее высокие относительно других почв концентрации растворенного органического углерода, нитратного азота, общего фосфора, железа, марганца и меди, соответственно и вынос этих элементов из гумусового горизонта значителен. Тем не менее, свыше 80% от содержания этих элементов закрепляется в почвенном профиле и расходуется на функционирование лесных сообществ, и уже из минеральных горизонтов выносятся минимальные количества. Под хвойно-лиственными сообществами склоновых ландшафтов более кислые почвенные воды минеральных горизонтов выносят относительно высокие количества РОУ, нитратного азота, железа и алюминия. Это обеспечивает поддержание устойчивого уровня их содержания в речных водах. Для того чтобы сделать окончательные выводы о концентрациях химических компонентов и величине их выноса с почвенными водами прибрежных зон горных рек и ручьев, требуется долгосрочный мониторинг в различные по характеру увлажнения периоды и годы.

## Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (темы № 121031000134-6 и № 122020900184-5) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-05-00812).

## Литература (References)

- Авессаломова И. А., Савенко А. В., Хорошев А. В.** 2013. Ландшафтно-геохимическая контрастность среднетаежных речных бассейнов как фактор формирования ионного стока // *Вестник МГУ. Сер. 5. География.* № 4. С. 3–10. (**Avessalomova I. A., Savenko A. V., Horoshev A. V.** 2013. Landscape-geochemical contrasts of the middle taiga river basins as a factor of the ion discharge formation. *Vestnik. MGU*(4): 3–10. [In Russian].) <https://www.elibrary.ru/rdwyywb>
- Аржанова В. С., Елпатьевский П. В.** 2005. Геохимия, функционирование и динамика горных геосистем Сихотэ-Алиня (юг Дальнего Востока России). – Владивосток: Дальнаука. 253 с. (**Arzhanova V. S., Yelpatyevsky P. V.** 2005. Geochemistry, functioning, and dynamics of rock geosystems of Sikhote–Alin (Southern Russian Far East). Vladivostok: Dalnauka, 253 pp. [In Russian].)
- Болдескул А. Г., Бурдуковский М. Л., Луценко Т. Н., Кожевникова Н. К., Шамов В. В., Губарева Т. С.** 2019. Роль почв в формировании состава природных вод в ландшафтах хвойно-широколиственных лесов центрального Сихотэ-Алиня // *Лесные почвы и функционирование лесных экосистем. Материалы VIII Всероссийской научной конференции с международным участием 24–27 сентября 2019.* – М.: ЦЭПЛ РАН. С. 163–166. (**Boldeskul A. G., Burdukovsky M. L., Lutsenko T. N., Kozhevnikova N. K., Shamov V. V., Gubareva T. S.** 2019. The role of soils in the formation of the composition of natural waters in the landscapes of mixed coniferous-broadleaved forest ecosystems of the Central Sikhote-Alin. In: *Forest soils and the functioning of forest ecosystems. Proceedings of the VII All-Russian Scientific Conference with international participation, September 24–27, 2019.* Moscow: CEPL RAS, p. 163–166. [In Russian].) <https://www.elibrary.ru/orhfyc>
- Болдескул А. Г., Шамов В. В., Гарцман Б. И., Кожевникова Н. К.** 2014. Ионный состав генетических типов вод малого речного бассейна: стационарные исследования в Центральном Сихотэ-Алине // *Тихоокеанская геология.* 2014. Т. 33. № 2. С. 90–101. (**Boldeskul A. G., Shamov V. V., Gartsman B. I., Kozhevnikova N. K.** 2014. Ionic composition of genetic types of waters of small river basin: stationary studies in the Central Sikhote Alin". *Tikhookeanskaya Geology* 33 (2): 90–101. [In Russian].)
- Васильев Н. Г.** 1977. Долинные широколиственные леса Сихотэ-Алиня. – М.: Наука. 116 с. (**Vasil'ev N. G.** 1977. [Valley broad-leaved forests of Sikhote-Alin]. М.: Nauka, 116 pp. [In Russian].)
- Елпатьевский П. В.** 1993. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. – М.: Наука. 254 с. (**Yelpatyevsky P. V.** 1993. Geochemistry of migration fluxes in the natural and natural–anthropogenic geosystems. М.: Nauka, 254 pp. [In Russian].)
- Ершов В. В., Исаев Л. Г., Поликарпова Н. В.** 2019. Содержание тяжелых металлов в атмосферных выпадениях в окрестностях заповедника «Пасвик» // *Вестник МГТУ.* Т. 22. № 1. С. 83–89. (**Ershov V. V., Isaeva L. G., Polikarpova N. V.** 2019. The content of heavy metals in atmospheric deposition in the Pasvik Nature Reserve vicinity. *Vestnik MSTU*(1): 83–89. [In Russian].) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-83-89>
- Жильцов А. С.** 2008. Гидрологическая роль горных хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья. – Владивосток: Дальнаука. 331 с. (**Zhil'tsov A. S.** 2008. Hydrological role of mountain coniferous-broad-leaved forests in Southern Primorye. Vladivostok: Dalnauka, 331 pp. [In Russian].)
- Кожевникова Н. К., Болдескул А. Г., Луценко Т. Н., Шамов В. В., Еловский Е. В., Касуров Д. А.** 2022. Микроэлементы в речных водах горно-лесных бассейнов (юг Дальнего Востока России) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* Т. 333. № 6. С. 190–205. (**Kozhevnikova N. K., Boldeskul A. G., Lutsenko T. N., Shamov V. V., Elovskiy E. V., Kasurov D. A.** 2022. Microelements in river water of mountain forest basins (southern Russian Far East). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 333(6): 190–205. [In Russian].) <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3548>
- Костенков Н. М.** 1987. Окислительно-восстановительные режимы в почвах периодического перувлажнения (Дальний Восток). – М.: Наука. 191 с. (**Kostenkov N. M.** 1987. [Redox regimes in soils of periodic waterlogging (Far East)]. М.: Nauka, 191 pp. [In Russian].)

- Луценко Т. Н., Кожевникова Н. К., Болдескул А. Г., Шамов В. В. 2021. Концентрация и экспорт растворенного органического углерода в ландшафтах бассейна Верхней Уссури // Материалы XVI Совещания географов Сибири и Дальнего Востока. – Владивосток: ТИГ ДВО РАН. С. 150–152. (Lutsenko T. N., Kozhevnikova N. K., Boldeskul A. G., Shamov V. V. 2021. [Concentrations and export of dissolved organic carbon in the landscapes of the Upper Ussuri River basin]. In: Materials of the XVI Meeting of geographers of Siberia and the Far East. Vladivostok: TIG FEB RAS, pp. 193–195. [In Russian].) [https://doi.org/10.35735/9785604701119\\_150](https://doi.org/10.35735/9785604701119_150)
- Перельман А. И. 1989. Геохимия. – М.: Высшая школа, 340 с. (Perelman A. I. 1989. Geochemistry. Moscow: Vysshaya shkola, 340 pp. [In Russian].)
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. 1977. – Л.: Гидрометеоздат. 542 с. ([Guide on chemistry analyses of surface continental waters]. 1977. Leningrad: Gidrometeoizdat, 542 pp. [In Russian].)
- Сапожников А. П. 1972. Характеристика органического вещества лесных подстилок елово-широколиственных лесов Приморья // Генезис бурых лесных почв. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 223 с. (Sapozhnikov A. P. 1972. [Characteristics of organic matter in forest litters of spruce-deciduous forests of Primorye. In: Genesis of brown forest soils]. Vladivostok: FESC AS USSR, 223 pp. [In Russian].)
- Сапожников А. П., Селиванова Г. А., Ильина Т. М., Дюкарев В. Н., Бутовец Г. А., Гладкова Г. А., Гавренков Г. И., Жильцов А. С. 1993. Почвообразование и особенности биологического круговорота веществ в горных лесах Южного Сихотэ-Алиня (на примере Верхнеуссурийского стационара). – Хабаровск: ДальНИИЛХ. 267 с. (Sapozhnikov A. P., Selivanova G. A., Pina T. M., Dyukarev V. N., Butovets G. A., Gladkova G. A., Gavrenkov G. I., Zhiltsov A. S. 1993. [Pedogenesis and biological cycle of substances in mountain forests of southern Sikhote-Alin (Far Eastern Scientific Research Institute of Forestry)]. Khabarovsk: FEFRI, 267 pp. [In Russian].)
- Свистов П. Ф., Першина Н. А., Павлова М. Т., Полищук А. И., Аблеева В. А. 2015. Кислотность и химический состав атмосферных осадков в Приокско-Террасном биосферном заповеднике // Труды Приокско-Террасного заповедника. Вып. 6. – Тула: Аквариус. С. 24–33. (Svistov P. F., Pershina N. A., Pavlova M. T., Polishchuk A. I., Ableeva V. A. 2015. The acidity and chemical composition of atmospheric precipitation in the Prioksko-Terrasnyi Biosphere Reserve. *Trudy Prioksko-Terrasnogo zapovednika*. Issue 6. Tula: Akvarius, pp. 24–33. [In Russian].) <https://www.elibrary.ru/riozjm>
- Селиванова Г. А. 1983. Биогеоценоотическая характеристика лесных подстилок Южного Сихотэ-Алиня // Почвоведение. № 8. С. 100–110. (Selivanova G. A. 1983. Biogeocoenotic characteristics of the forest litters in the southern Sikhote-Alin mountains. *Pochvovedenie* 8: 100–110. [In Russian].)
- Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. 2004. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена. 342 с. (Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I., Gerasimova M. I. 2004. [Classification and diagnostics of Russian soils]. Smolensk: Oikumena, 342 pp. [In Russian].)
- Bugaets A. N., Pshenichnikova N. F., Tereshkina A. A., Lupakov S. Yu., Gartsman B. I., Shamov V. V., Gonchukov L. V., Golodnaya O. M., Krasnopeev S. M., Kozhevnikova N. K. 2021. Digital soil mapping for hydrological modeling with the example of experimental catchments (south of Primorsky Krai). *Eurasian Soil Science* 54(9): 1375–1384. <https://doi.org/10.1134/S1064229321050057>
- David M. B., Vance G. F., Kahl J. S. 1992. Chemistry of dissolved organic carbon and organic acids in two streams draining forested watershed. *Water Resources Research* 2(28): 189–396. <https://doi.org/10.1029/91WR02180>
- Iavorivska L., Boyer E. W., De Walle D. R. 2016. Atmospheric deposition of organic carbon via precipitation. *Atmospheric Environment* 146: 153–163. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.06.006
- Kalbitz K., Solinger S., Park J.-H., Michalzik B., Matzner E. 2000. Controls of the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Science* 165(4): 277–304. <https://doi.org/10.1097/00010694-200004000-00001>
- Kozhevnikova N. K., Boldeskul A. G., Lutsenko T. N., Gubareva T. S., Lupakov S. Yu., Shamov V. V. 2022. Formation of rainwater acidity in the forested basin of the Sikhote Alin mountain region. *Geochemistry International* 60(12):1298–1311. <https://doi.org/10.1134/S0016702922110052>
- Lidman F., Boily Å., Laudon H., Köhler S. J. 2017. From soil water to surface water – how the riparian zone controls element transport from a boreal forest to a stream. *Biogeosciences* 14: 3001–3014. <https://doi.org/10.5194/bg-14-3001-2017>

- Lukina N. V., Ershov V. V. , Gorbacheva T. T., Orlova M. A., Isaeva L. G., Teben'kova D. N.** 2018. Assessment of soil water composition in the northern taiga coniferous forests of background territories in the industrially developed region. *Eurasian Soil Science* 51(3): 285–297. <https://doi.org/10.1134/S1064229318030079>
- Maitat O., Boudot J., Merlet D., Rouilled J.** 2000. Aluminium chemistry in two contrasted acid forest soils and headwater streams impacted by acid deposition, Vosges Mountains, N. E. France. *Water Air Soil Pollution* 117(1): 217–243. <https://doi.org/10.1023/A:1005132321147>
- Moiseenko T. I., Gashkina N. A.** 2007. The distribution of trace elements in surface continental waters and the character of their migration in water. *Water Resources* 34(4): 423–437. <https://doi.org/10.1134/S0097807807040070>
- Shulkin V. M., Bogdanova N. N., Elovskiy E. V.** 2022. Effect of filter clogging on the determination of concentrations of chemical elements migrating in river water as components of true solutions or in colloidal forms. *Water Resources* 49(1): 122–133. <https://doi.org/10.1134/S009780782201016X>