

УДК 630\*116.25:556.114.6 (571.63)

## ВОДНАЯ МИГРАЦИЯ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСАХ СИХОТЭ-АЛИНЯ

Н. К. Кожевникова<sup>1</sup>, Т. Н. Луценко<sup>2</sup>, А. Г. Болдескул<sup>2</sup>, С. Ю. Лупаков<sup>2</sup>, В. В. Шамов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН  
690022, Владивосток, просп. 100-летия Владивостока, 159

<sup>2</sup> Тихоокеанский институт географии ДВО РАН  
690041, Владивосток, ул. Радио, 7

E-mail: nkozhevnikova@ibss.dvo.ru, luts@tig.dvo.ru, boldeskul@tig.dvo.ru, rbir@mail.ru,  
vlshamov@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.10.2016 г.

Дан анализ пространственной изменчивости химического состава подкroновых, почвенных и речных вод горного лесного бассейна. Показано, что уже на входе с атмосферными осадками прослеживается влияние биотических компонентов бассейна на элементный состав вод. Входные потоки кислые, сульфатные – с высокой долей участия ионов водорода, калия, растворимых органических веществ. Разнообразие экотопических условий определяет дальнейшую трансформацию элементного состава природных вод. Роль древесных кроны в преобразовании химического состава вод усиливается пропорционально их сомкнутости и возрастному развитию древостоев. По степени трансформации макроэлементов и нейтрализации кислотности дождей лесные сообщества располагаются в ряд: смешанные > хвойные > молодые лиственные. Основными макрокомпонентами в подкroновом пространстве становятся органический углерод, калий и кальций. Среди минеральных анионов доминируют сульфаты, модуль поступления которых под древесный полог составляет 9–11 кг/га за период вегетации. На этапе миграции в почвенном профиле постепенно ограничивается перенос биогенных элементов. Сульфатно-калиевый состав кroновых вод пихтово-еловых и вторичных сообществ трансформируется в сульфатно-натриево-кальциевый. В почвенных водах под лесами широколиственно-кедровых типов сохраняется доминирование гидрокарбонатов, а модуль выноса  $K^+$  снижается на порядок. Геохимический тип речных вод сохраняет особенности элементного состава дренируемых участком реки почв. Для верхнего течения рек установлен незначительный вынос из экосистемы сульфатов и гидрокарбоната кальция. На склонах с преимущественно кедрово-широколиственными типами леса вынос  $HCO_3^-$  и  $Ca^{2+}$  компенсируется значительным поступлением этих элементов с кroновыми водами.

**Ключевые слова:** горно-лесной бассейн, лесные сообщества, кroновые воды, химический состав природных вод, водная миграция, почвенные воды, геохимический тип вод.

DOI: 10.15372/SJFS20170306

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что высокая эффективность функционирования лесов достигается благодаря интенсивному и постоянному обмену веществом и энергией в системе атмосфера – лесной полог – почва. Связующим звеном в этой многокомпонентной системе является вода, характер и форма миграции которой играют ведущую роль в формировании почв и питательного режима лесов (Лукина, Никонов, 1998; Перельман,

Касимов, 1999; Аржанова, Елпатьевский, 2005). После взаимодействия с надземной фитомассой древостоев происходит значительная трансформация химического состава атмосферной воды (Соколов, 1972; Likens, Vormann, 1995; Никонов, Лукина, 2000; Пристова, 2005). Осадки включаются в состав биогеоценоза и активно воздействуют на биологический круговорот. Дальнейшая миграция водных потоков оказывает существенное влияние на элементный состав поверхностных вод (Алексеенко, 1989; Дымов,

2013) и определяет потенциал водных ресурсов для жизнеобеспечения и поддержания возобновляющейся биологической продукции.

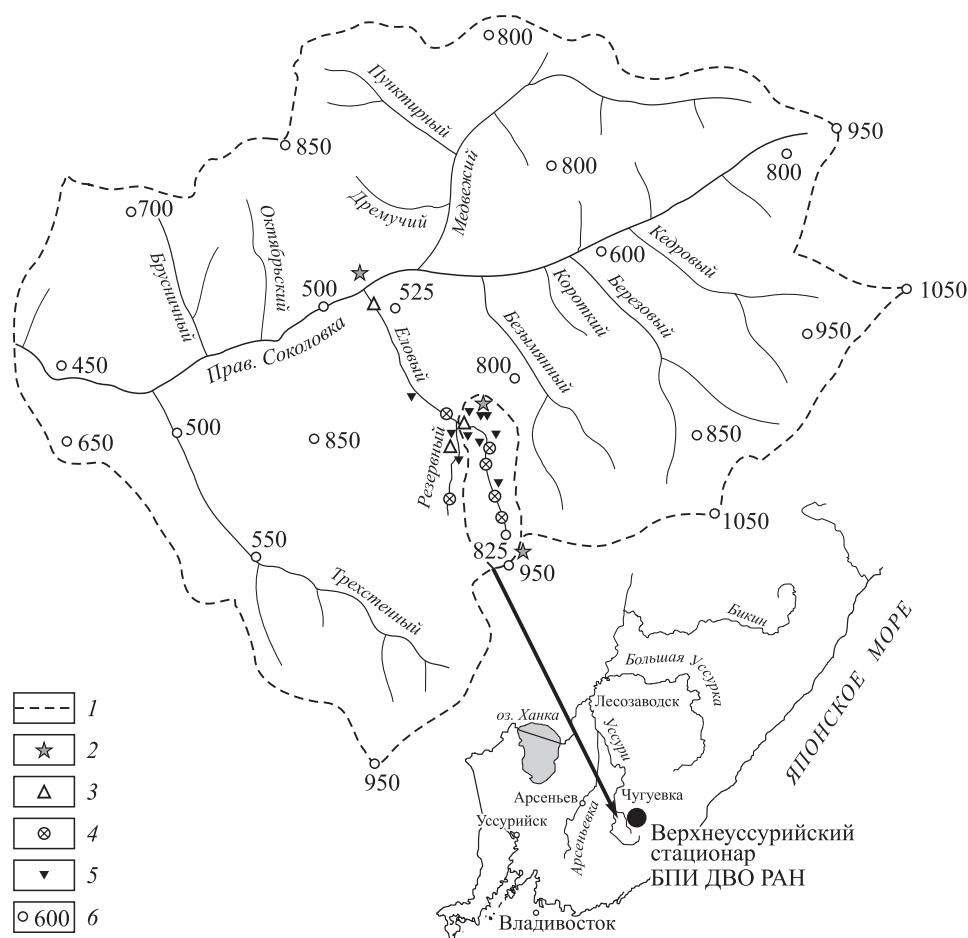
Процессы трансформации атмосферных осадков лесной растительностью и характер поступления под их полог микро- и макроэлементов активно изучаются в таежных зонах европейской части России, в которых к настоящему времени собран обширный материал по влиянию атмосферных выпадений на элементный состав и кислотность почв естественных и техногенных экосистем (Соколов, 1972; Лукина, Никонов, 1998; Копчик и др., 2007; Арчегова, Кузнецова, 2011; Евтюгина, Асминг, 2013; Робакидзе и др., 2013). На Дальнем Востоке такие исследования единичны, хотя изменения структуры лесного покрова (Кожевникова, Дюкарев, 2011), характера выпадения атмосферных осадков и их элементного состава (Муха и др., 2012; Кондратьев и др., 2013) ведут к перестройке сложившихся биогеохимических циклов основных элементов питания. Интенсивные исследования круговорота веществ в лесах Сихотэ-Алинской горной области проводились в 1980–1990 гг. В последовательно сменяющихся высотных поясах растительности определены запасы элементов питания, обоснованы закономерности биоциркуляции, изменения свойств горных почв и процессов миграции вещества в природных и антропогенных ландшафтах (Костенкова, 1976; Елпатьевский, 1993; Сапожников и др., 1993; Аржанова, Елпатьевский, 2005; Луценко и др., 2006). Наряду с достижениями в области понимания внутрисистемных процессов в среде лесного бассейна остаются недостаточно изученными механизмы этих взаимодействий. Очень мало натуральных данных о качественной связи химических свойств атмосферных осадков, почвенных и речных вод определенного ландшафта. Нет количественных оценок пространственной и временной изменчивости поступления и экспорта растворенных веществ с лесных бассейнов региона.

Цель данной работы – оценить степень влияния типа леса и возрастной структуры древостоев на пространственную изменчивость природных вод горного бассейна. Для более глубокого понимания водной миграции элементов между лесными сообществами и малыми речными бассейнами проанализирован состав входных потоков вещества с атмосферными осадками, обсуждены факторы, влияющие на поступление питательных веществ под полог основных лесных сообществ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на западном макросклоне Южного Сихотэ-Алиня (43.6–44.3° с. ш.; 133.5–134.5° в. д.) в Верхнеуссурийском стационаре (ВУС) Биолого-почвенного института ДВО РАН. Бассейн закрыт горными хребтами и удален от моря на ~ 400 км. Муссонный характер циркуляции атмосферы обуславливает теплый и влажный летне-осенний период. С апреля по октябрь выпадает от 400 до 1100 мм осадков, около 70 % из них – в июне–сентябре. В функционировании ландшафта активную роль играет лесной покров, занимающий около 98 % всей территории. Своеобразный пояс контакта широколиственно-кедровых и неморальных пихтово-еловых типов леса формирует устойчивые смешанные сообщества с постоянным участием кедра *Pinus koraiensis*, ели *Picea ajanensis*, пихты *Abies nephrolepis* и многочисленных лиственных пород (*Betula costata*, *B. mandshurica*, *Acer mono Maxim.*, *Tilia taquetii*, *Fraxinus mandshurica*, *Ulmus laciniata* и др.).

Почвы склонов и вершин водоразделов в районе ВУС развиты преимущественно на элювиальных, элювиально-делювиальных и гравитационно-делювиальных отложениях, представленных (в зависимости от литологии коренных пород и рельефа) от крупноглыбистого материала осыпей в местах распространения эффузивных горных пород до щебнисто-суглинистого и песчано-суглинистого состава на месте залегания осадочных горных пород (Гавренков, 1977). Широко распространенные на ВУС горно-лесные бурые и горные буротаежные почвы в условиях быстрого водообмена имеют ряд общих черт, но наиболее существенными различиями между ними являются содержание органического вещества и его качественный состав (Сапожников, Гавренков, 1979; Сапожников и др., 1993). В лесных почвах основной запас питательных веществ сосредоточен в лесной подстилке и гумусовом горизонте, где происходит почти замкнутый круговорот питательных веществ в системе почва – лесное сообщество (Костенкова, 1976; Селиванова, 1983). Биогеоценозы ВУС различаются по интенсивности накопления и общим запасам органического вещества, имеют равные массы опада, но заметно отличаются по интенсивности разложения подстилок, поэтому относятся к разным типам круговорота веществ (Сапожников и др., 1993).



**Рис. 1.** Карта-схема Верхнеуссурийского стационара и объектов изучения в бассейне руч. Еловый. Условные обозначения: 1 – границы экспериментального бассейна; 2 – местоположение метеостанции; 3 – местоположение гидрометрических и гидрохимических створов; 4 – места разового отбора русловых вод; 5 – местоположение точек отбора природных вод; 6 – высотные отметки рельефа, м БС.

Руч. Еловый является левым притоком р. Правая Соколовка (рис. 1), относящейся к системе Верхней Усури. Общая протяженность ручья составляет 3.5 км, площадь водосбора 4.2 км<sup>2</sup>, диапазон высот – от 500 до 950 м над ур. м. Сток по ручью устойчивый, и полного пересыхания его не наблюдалось даже в самые засушливые годы (Жильцов, 2008). В верхнем течении ручья в 1965–1966 гг. проведена экспериментальная вырубка леса и на площади 82 га (далее экспериментальный бассейн) проводились комплексные изыскания.

Экспериментальный бассейн (ЭБ) представлен водотоком 1-го порядка, границей которого в нижней его части служит бетонный водослив с широким порогом. Коренные леса с преобладанием пихты, ели и кедра относятся в основном к III–IV классам бонитета и занимают 38 % общей площади в верхней и средней части ЭБ. На остальной площади ЭБ происходит процесс

формирования и развития вторичных лесов с преобладанием лиственных пород.

Руч. Резервный, впадающий в руч. Еловый на расстоянии около 50 м от водослива, является эталонным водосбором. На его склонах сохранились коренные кедровники, возраст господствующих пород которых 120–280 лет (Жильцов, 2008). Площадь после впадения руч. Резервный и до устья однократно пройдена условно-сплошной рубкой в 1950–1960-х гг. Небольшие участки с коренными лесами сохранились на крутых склонах и в долине ручья. Для бассейна в целом соотношение площадей, занятых различными лесными формациями, изменяется в сторону увеличения доли широколиственно-кедровых лесов. Ельники различных типов занимают 24 %, кедрово-еловые леса – 18 % общей площади. Лесистость бассейна после естественного восстановления вырубок приближена к 100 %.

Натурные наблюдения проводили в 2011–2014 гг. с мая по октябрь. С помощью автоматизированных систем непрерывной регистрации данных велась запись количества осадков, температуры и влажности воздуха, уровня воды. Метеонаблюдения выполняли на расчищенных от леса площадках размером не менее 30 × 30 м с использованием осадкомеров HD2013 Delta ОНМ и метеостанции типа WS–GP1 Delta-T. Гидрометрические посты оборудованы цифровыми регистраторами типа LTC Lever-logger Junior Solinst или Dipper-3ТЕС SEBA, выполняющими запись уровня и температуры воды. Расходы воды измеряли с помощью измерителя скорости FlowSens SEBA Hydrometrie. Для наблюдений за стоком в ЭБ использовали сохранившийся бетонный водослив с широким порогом, посредством которого в меженный период расход воды измеряли объемным методом.

Химический состав природных вод изучали по всей протяженности руч. Еловый и на склонах всех экспозиций. Пробы вод на химический анализ отбирали систематически в течение сезона с охватом различных периодов увлажнения. Всего за 2011–2014 гг. отобрано и проанализировано 362 речных, 228 почвенных и 98 дождевых проб.

**Атмосферные осадки** для химического анализа собирали в устойчивые к кислой среде полиэтиленовые конусообразные пробоотборники. Приемная поверхность их располагалась на высоте 1.5 м от поверхности почвы. Размер конусов позволяет отбирать около 0.5 л воды при выпадении 3 мм осадков. На поляне пробоотборники подвешивали на расстоянии не менее 3 м от деревьев и построек. Для сбора кроновых (или подкроновых) вод оборудовали 4 площадки с контрастными для бассейна биотопами, различающимися по степени эдификаторного воздействия доминирующих видов деревьев (табл. 1).

Пробоотборники подвешивали таким образом, чтобы в них поступали воды с сомкнувшихся крон лесообразующих пород на протяжении от ствола к периферии проекции крон. В пихтово-еловых (ПЕ), вторичных березовых (ВБ), вторичных хвойно-лиственных (ВХЛ) и кедрово-широколиственных (КШ) сообществах отбирали по две пробы, которые смешивали для дальнейшего анализа. В лесных сообществах определяли сомкнутость крон (СК). Лесотаксационные описания в табл. 1 приведены для постоянных пробных площадей (Жильцов, 2008), в пределах которых выбраны растительные сообщества.

**Таблица 1.** Таксационные описания насаждений в местах отбора ландшафтных вод

| Бассейн, площадь, км <sup>2</sup> | Тип леса*, состав и возраст древостоев                     | Абсолютная высота, экспозиция и крутизна склона | СК  | Вид изучаемых природных вод                   |
|-----------------------------------|--|---|-----|---|
| Еловый, ЭБ, 0.77                  | К4, 5КЗБж1Еа1Пб (80–120 лет)                               | 830 м, 3 – 27°                                  | 0.8 | Кроновые (ПЕ), лизиметрические                |
|                                   | К4, 3КЗБж1Еа1Пб2Лп ед. Кл                                  | 810 м, долина ручья                             | –   | Лизиметрические                               |
|                                   | Сплошная вырубка 1965 г. 5Бж1Еа1Бб 1Т1Лп1К (40–70 лет)     | 740 м, В – 15°                                  | 0.6 | Кроновые (ВБ), лизиметрические                |
|                                   | КЕ-5, 3Еа3Лпт2Бж1К1Пб (80–140 лет)                         | 710 м, СЗ – 14°                                 | 0.9 | Кроновые (КШ)                                 |
|                                   | Сплошная вырубка 1965/66 г. 4Бж3Т1Лп1Ос1Пб + К (40–70 лет) | 680 м, С – 16°                                  | 0.7 | Кроновые (ВХЛ), подстилочные, лизиметрические |
| Резервный, 1.05                   | Сплошная вырубка 1965/66 г. 3Бж2Т1К1Кл1Лп2Вм (40–70 лет)   | 695 м, Ю – 20°                                  | –   | Лизиметрические                               |
|                                   | КЕ-5, 3К4Еа1П1Бж1Лп (100–260 лет)                          | 780 м, ССЗ – 16°                                | –   | »   |
|                                   | КЕ-6, 3К3Еа1П2Бж1Лп (120–280 лет)                          | 735 м, СЗ – 14°                                 | 1.0 | Кроновые (КШ), лизиметрические                |
| Еловый, устье, 3.47               | К4, 3К3Еа2Бж1Пб1Лп (80–160 лет)                            | 735 м, ЮВ – 25°                                 | –   | Лизиметрические                               |
|                                   | К6, 2К2Еа1П3Лп2Д (70–180 лет)                              | 570 м, 3 – 18°                                  | –   | »   |

*Примечание.* \* К4 – разнокустарниковый кедровник с желтой березой; К6 – кленово-лещинный кедровник с липой и дубом; КЕ-5 – мшисто-папоротниковый кедрово-еловый лес с липой и березой желтой; КЕ-6 – мшисто-лещинный кедрово-еловый лес с липой и березой желтой.

**Лизиметрические (почвенные) воды (ЛВ)** отбирали методом вакуумной фильтрации из почв ненарушенного сложения. Тензиолизиметры типа DIK 8392, Daiki Rike Kogyo Co с керамическими наконечниками закладывали вертикально на глубину от 35 до 60 см в местах концентрации гравитационной влаги. На склонах разных экспозиций и под различными типами леса установили 9 лизиметров (см. табл. 1). При расчете выноса элементов из почвы учитывали их среднее содержание в лизиметрах, установленных в пределах водосборов исследуемых ручьев. Воды почв ЭБ изучали по пяти, руч. Резервный – по трем лизиметрам. Склоны нижней части руч. Еловый (устье) сухие, поэтому установить тензиолизиметр удалось лишь в одной точке. Устье руч. Еловый характеризует вынос элементов со всей площади бассейна, поэтому величину почвенного стока рассчитывали как среднее из всех установленных в бассейне лизиметров. В 2014 г. во вторичном хвойно-лиственном лесу поставили гравитационные лизиметры под подстилочный и гумусовый горизонты.

**Пробы воды из ручьев (РВ)** отбирали на трех гидрохимических створах в пластиковую посуду одновременно с измерением в русле расхода воды. В меженные периоды данный вид работ производили ежедневно, в паводковые – 2–3 раза в сутки.

**Химический анализ.** В нефилтрованной пробе в день отбора измеряли pH, электропроводность и потенциметрическим титрованием по стандартной методике (Руководство..., 1977) определяли содержание гидрокарбоната. Воды пропускали через фильтр Dugarcie Millipore с диаметром пор 0.45 мкм. Для проведения анализов пробы подкисляли азотной кислотой. Содержание главных анионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) определяли на жидкостном хроматографе Shimadzu LC 10Avr, главных катионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) – на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA-6800, кремния –

спектрофотометрическим методом, а растворенного органического углерода ( $\text{C}_{\text{орг}}$ ) в воде – с помощью ТОС-анализатора (Shimadzu TOC-VCPN).

**Анализ данных.** При обработке данных использовали методы статистического и корреляционного анализов. Приведенные в работе средние значения и коэффициенты парной корреляции ( $R$ ) значимы на уровне  $p < 0.05$ .

Осадки под пологом леса определяли расчетным путем:  $X_{\text{п}} = a \times X^b$ , где  $X_{\text{п}}$  и  $X$  – осадки под пологом леса и на поляне соответственно, мм. Для пихтово-еловых, кедрово-широколиственных и вторичных сообществ коэффициенты соответственно равны:  $a$  – 0.34, 0.512 и 0.437;  $b$  – 1.186, 1.075 и 1.136. Осадки под пологом рассчитывали ежемесячно и отдельно для каждого типа леса. Модули прихода/выноса химических элементов рассчитывали как произведение средней за сезон концентрации макрокомпонента (мг/л) на количество осадков (приход, мм) или слой стока (вынос, мм) за аналогичный период. Дальнейший анализ выноса элементов из почвы и реки производили отдельно для каждого бассейна. Слой стока в подстилочном горизонте принят в расчете 60–75 %, иллювиальном – 20–35 % от суммарного количества осадков (Аржанова, Елпатьевский, 2005). Речной сток рассчитан с применением кривых  $Q = f(H)$  на основании измеренных расходов ( $Q$ ) и уровней ( $H$ ) воды.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ температурного фона ( $T$ , °C) и увлажненности исследуемого бассейна показывает, что вегетационный сезон в 2011–2014 гг. был жарким и умеренно-влажным (табл. 2).

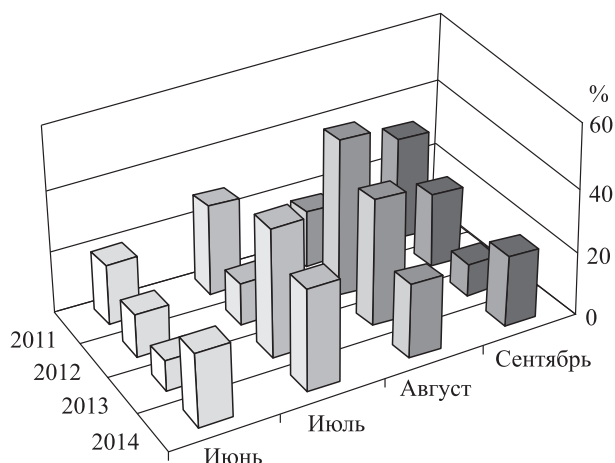
Температура воздуха была на 11–16 % выше среднемноголетних значений. Осадки выпадали неравномерно и чередовались с длительными сухими периодами (рис. 2).

Ежегодно проходило 5–7 циклонов продолжительностью от 4 до 14 дней и суммарным ко-

**Таблица 2.** Климатические характеристики бассейна в июне–сентябре

| Год               | $T$ , °C | Осадки на поляне, мм |      |      | Осадки под пологом леса, мм |            |
|-------------------|----------|----------------------|------|------|-----------------------------|------------|
|                   |          | Всего                | < 10 | > 10 | коренного                   | вторичного |
| 2011              | –        | 394                  | 133  | 261  | 302                         | 325        |
| 2012              | 15.8*    | 490                  | 97   | 393  | 394                         | 423        |
| 2013              | 16.1     | 438                  | 123  | 315  | 349                         | 375        |
| 2014              | 16.1     | 517                  | 111  | 406  | 409                         | 439        |
| Среднемноголетнее | 14.6     |                      | 450  |      | 329                         | 335        |

*Примечание.* \* Среднее за август–сентябрь; среднемноголетнее за эти месяцы составляет 13.8 °C.



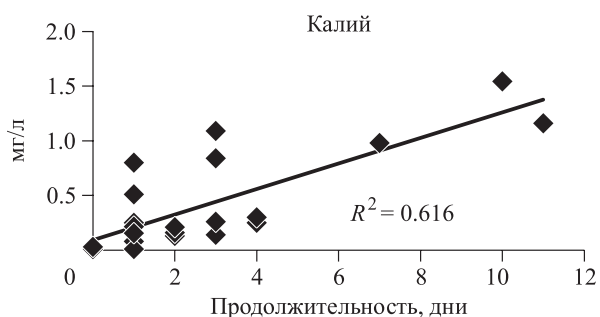
**Рис. 2.** Распределение осадков по месяцам за июнь–сентябрь 2011–2014 гг.

личеством осадков 35–130 мм. Большая часть влаги в количестве от 0.2 до 10 мм поступала в виде малоинтенсивных непродолжительных дождей. Это оказало существенное влияние на поступление химических элементов под полог леса. Кронами сомкнутых коренных древостоев было задержано 14–32 %, а молодых лиственных – 8–27 % осадков.

Дождевые осадки ультрапресные (минерализация 1–31 мг/л), кислые, сульфатные (или хлоридно-сульфатные) калиево-кальциевые с высокой долей участия ионов водорода. Соотношение основных ионов (%-экв.) имеет следующий вид:

$$M_{0.02} \frac{SO_4^{-2} 44 NO_3^- 23 Cl^- 19 HCO_3^- 14}{H^+ 44 Ca^{2+} 28 [K^+ 15 Na 8 Mg^{2+} 6]} \times \times pH \ 3.8 - 5.7.$$

Повышенная концентрация ионов и высокая минерализация наблюдались в дождях, выпадающих после длительного сухого периода. Это могли быть как внутримассовые осадки, так



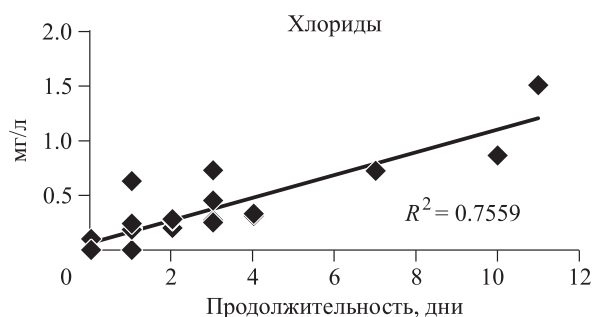
и дожди начальной фазы продолжительных циклонов. Анализ дождей, выпавших после сухого периода длительностью от 4 до 15 дней, показал, что минерализация их возрастает до 10–30 мг/л. В пробах дождя существенно увеличивается концентрация магния ( $Mg^{2+}$ ) и органического углерода, калия ( $K^+$ ) и хлорид-ионов (рис. 3).

Эквивалентное содержание ионов калия составляет 40–60 % от суммы катионов. В последующих дождях до 30–75 %-экв. возрастает доля кальция ( $Ca^{2+}$ ), а  $K^+$  снижается до 12–1 %.

Обогащение дождевых вод в залесенных бассейнах калием и  $C_{орг}$  связывают с поступлением их в приземный слой в составе транспирационной влаги (Likens et al., 1994; Аржанова, Елпатьевский, 2005).

Средние концентрации хлорид-иона и натрия ( $Cl^-$  и  $Na^+$ ) в осадках значительно ниже величин, характерных для региона (Чудаева и др., 2008), хотя в отдельных дождях содержание этих ионов выше средних и находится в пределах 0.58–4.3 и 0.30–0.96 мг/л соответственно. Концентрация ионов водорода ( $H^+$ ) за исследуемый период составила 15–86 %-экв. от суммы катионов, а сульфат-иона ( $SO_4$ ) – 16–78 %-экв. от суммы анионов. Близкие результаты по минерализации и особенностям химического состава атмосферных осадков получены для Дальнего Востока (Чудаева и др., 2008) и других регионов России (Нецветаева и др., 2012; Евтюгина, Асминг, 2013; Робакидзе и др., 2013).

Кислотность атмосферных вод в пределах равновесного значения pH 5.6 зафиксирована в единичных пробах. Высокая частота выпадения дождей с pH < 5.6 при сравнительно низком уровне ионных концентраций выявлена в пределах малого лесного бассейна на юге Китая (Huang et al., 2012). Авторы отмечают, что только ~ 5 % выпавших осадков имели pH > 5.5, а осадки с pH < 4.5 составили около 55 %. Аналогичное распределение величины pH по группам



**Рис. 3.** Зависимость концентраций калия и хлорид-ионов в дождевых осадках от продолжительности сухого периода.

**Таблица 3.** Содержание (мкмоль·л<sup>-1</sup>) в теплый период года основных катионов (ОК), гидрокарбонатов (НСО<sub>3</sub>) и анионов сильных кислот (АСК) в осадках на поляне (АО) и под кронами лесных сообществ. Кислотность вод (рН) и ряды убывания макроэлементов

| Место отбора         | рН          | НСО <sub>3</sub> | АСК         | ОК          | Ряды убывания, %-экв.                                     |                      |
|----------------------|-------------|------------------|-------------|-------------|---|----------------------|
|                      |             |                  |             |             | анионов   | катионов             |
| <i>Весна (n = 4)</i> |             |                  |             |             |   |                      |
| АО                   | 4.6 ± 0.54  | 2.05 ± 2.00      | 44.7 ± 23.4 | 24.4 ± 10.9 | SO <sub>4</sub> > NO <sub>3</sub> > HCO <sub>3</sub> > Cl | H > Ca > K > Mg > Na |
| ВБ*                  | 4.42 ± 0.21 | < 0.1            | 146 ± 133   | 179 ± 147   | SO <sub>4</sub> > NO <sub>3</sub> > Cl > HCO <sub>3</sub> | H > Ca = K > Mg > Na |
| ВХЛ                  | 4.55 ± 0.12 | < 0.1            | 188 ± 148   | 266 ± 219   | SO <sub>4</sub> > NO <sub>3</sub> > Cl > HCO <sub>3</sub> | Ca > K > H > Mg > Na |
| КШ                   | 5.66 ± 0.02 | 78.0 ± 20.0      | 196 ± 116   | 491 ± 161   | SO <sub>4</sub> > HCO <sub>3</sub> > Cl > NO <sub>3</sub> | Ca > K > Mg > Na > H |
| ПЕ                   | 4.81 ± 0.06 | 17.9 ± 14.0      | 60.2 ± 20.2 | 174 ± 51.7  | SO <sub>4</sub> > Cl > NO <sub>3</sub> > HCO <sub>3</sub> | Ca > K > Mg > H > Na |
| <i>Лето (n = 12)</i> |             |                  |             |             |   |                      |
| АО                   | 4.84 ± 0.58 | 1.60 ± 1.10      | 54.4 ± 15.9 | 21.0 ± 3.4  | SO <sub>4</sub> > NO <sub>3</sub> > Cl > HCO <sub>3</sub> | H > Ca > K > Na > Mg |
| ВБ*                  | 4.66 ± 0.20 | < 0.1            | 53.4 ± 21.3 | 83.4 ± 19.1 | SO <sub>4</sub> > Cl > NO <sub>3</sub> > HCO <sub>3</sub> | K > H > Ca > Mg > Na |
| ВХЛ                  | 5.11 ± 0.14 | < 0.1            | 46.7 ± 18.6 | 141 ± 22.0  | SO <sub>4</sub> > Cl > NO <sub>3</sub> > HCO <sub>3</sub> | K > Ca > Mg > H > Na |
| КШ                   | 5.80 ± 0.14 | 151 ± 38.1       | 77.1 ± 19.3 | 426 ± 55.4  | HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub> > NO <sub>3</sub> | K > Ca > Mg > Na > H |
| ПЕ                   | 4.91 ± 0.12 | < 0.1            | 100 ± 39.1  | 215 ± 44.2  | SO <sub>4</sub> > Cl > NO <sub>3</sub> > HCO <sub>3</sub> | K > Ca > Mg > H > Na |
| <i>Осень (n = 4)</i> |             |                  |             |             |   |                      |
| АО                   | 4.88 ± 0.29 | 2.70 ± 2.70      | 76.1 ± 20.4 | 73.9 ± 19.7 | SO <sub>4</sub> > Cl > NO <sub>3</sub> > HCO <sub>3</sub> | Ca > H > K > Na > Mg |
| ВБ*                  | 5.40 ± 0.19 | 48.7 ± 25.8      | 103 ± 34.1  | 425 ± 175   | SO <sub>4</sub> > Cl > HCO <sub>3</sub> > NO <sub>3</sub> | K > Ca > Mg > Na > H |
| ВХЛ                  | 5.38 ± 0.16 | 37.4 ± 24.7      | 113 ± 39.6  | 400 ± 200   | SO <sub>4</sub> > Cl > HCO <sub>3</sub> > NO <sub>3</sub> | K > Ca > Mg > Na > H |
| КШ                   | 6.19 ± 0.20 | 129 ± 40.0       | 247 ± 51.1  | 683 ± 169   | Cl > HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > NO <sub>3</sub> | K > Ca > Mg > Na > H |
| ПЕ                   | 5.24 ± 0.40 | 12.0 ± 12.0      | 128 ± 26.4  | 267 ± 63.1  | Cl > SO <sub>4</sub> > HCO <sub>3</sub> > NO <sub>3</sub> | K > Ca > Mg > Na > H |

*Примечание.* Приведено среднее арифметическое ± стандартное отклонение; n – число проб. \* – ВБ и ВХЛ – вторичные березовые и хвойно-лиственные леса; КШ и ПЕ – коренные кедрово-широколиственные и пихтово-еловые леса.

кислотности характерно для исследуемых нами дождевых вод.

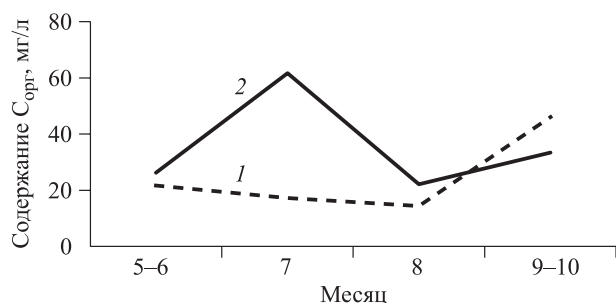
В подкрановых пространствах древостоев атмосферные выпадения приобретают выраженный биогенный характер. Тип леса, количество осадков и их кислотность, сомкнутость древесных крон, индекс листовой поверхности выступают в качестве основных факторов, контролирующих сезонную и пространственную изменчивость химического состава крановых вод (De Schrijver et al., 2007; Berger et al., 2008; Markova et al., 2009). Концентрация химических компонентов в исследуемых нами крановых водах, как правило, находится в обратной зависимости от количества осадков и прямой – от сомкнутости крон. Коэффициенты парной корреляции (n = 55) равны соответственно -0.34 и 0.53. Несмотря на некоторые количественные различия поступающих с осадками ионов, эффект преобразования их пологом древостоев и динамика поступления питательных веществ в течение сезона в разных бассейнах сходны (Лукина, Никонов, 1998; Пристова, 2005; Zhang et al., 2007; De Schrijver et al., 2007; Berger et al., 2008; Арчегова, Кузнецова, 2011; Робакидзе и др., 2013). Концентрации поступающих с крано-

выми водами (КВ) катионов в течение теплого сезона убывают в одинаковой последовательности: K > Ca > Mg. Минерализация КВ возрастает в 3–9 раз, и частично нейтрализуется кислотность атмосферных осадков (табл. 3).

Количественные расхождения часто связаны с влиянием состава леса на суммарное поступление под полог древостоев питательных веществ. Так, в работе (Berger et al., 2008) содержание основных катионов в водных растворах располагается в ряду лиственные < смешанные < хвойные древостои, а De Schrijver с коллегами (2007), проанализировав КВ в 38 парных комбинациях хвойные/лиственные породы, пришли к выводу, что поступление основных катионов под лиственными древостоями выше. В результате наших исследований установлено, что более высокой концентрацией органических и большинства минеральных компонентов характеризуются крановые воды высокопродуктивных сообществ (см. табл. 3, рис. 4).

Количество вымываемых катионов из крон КШ сообществ в 2–6 и в 1.5–3 раза больше, чем из крон вторичных и ПЕ соответственно.

Содержание химических элементов в крановых водах коррелирует с зольным составом



**Рис. 4.** Среднее за месяц содержание органического углерода в водах под кронами вторичных (1) и коренных (2) сообществ ВУС.

основных лесообразующих пород. В листьях березы желтой *Betula costata* и липы Таке *Tilia taquetii*, присутствующих в составе КШ лесов, содержание зольных элементов выше, чем в хвойных породах: кальция, кремния и магния — в 1.5–3, калия — в 5–8 раз (Сапожников и др., 1993).

Молодые и средневозрастные фитоценозы, вероятно, расходуют существенную часть элементов на формирование органической массы древостоя и оказывают большее сопротивление их выщелачиванию из ассимилирующих органов. Различия ионных балансов под старо- и средневозрастными древостоями сокращаются к осени. Барьерные функции кроны в отношении кислотных осаджений в большей степени проявляются в коренных сообществах (см. табл. 3).

Основным макрокомпонентом кроновых вод становится органический углерод ( $C_{\text{орг}}$ ), содержание которого подвержено пространственной, сезонной (см. рис. 4) и межгодовой вариабельности.

В КВ коренных сообществ концентрация  $C_{\text{орг}}$  максимальна летом, вторичных — осенью. Динамика поступления и содержания органического углерода в кроновых водах исследуемых сообществ соответствует данным, полученным для старовозрастных ельников и вторичных лесов средней тайги (Пристова, 2005; Робакидзе и др., 2013). Валовое поступление за вегетационный период  $C_{\text{орг}}$  во вторичных хвойно-лиственных лесах (табл. 4) более чем в 2 раза выше пока-

зателей, приведенных Т. А. Пристовой (2010). Это, возможно, связано с большим количеством выпадающих в Приморском крае дождевых осадков.

Неорганический углерод, содержащийся в составе гидрокарбонатов, отсутствует в весенне-летний период в водах, проникающих под кроны ПЕ и вторичных сообществ. В КВ смешанных коренных сообществ суммарное значение гидрокарбонат-иона за теплый сезон составляет более 30 %-экв. от суммы всех ионов. В зависимости от увлажненности года и кислотности осадков с кроновыми водами вторичных, ПЕ и КШ древостоев поступает 0.3–15; 1.5–1.7; 25–42 кг  $\text{HCO}_3$  на 1 га соответственно (см. табл. 4).

Для местообитаний, занимаемых коренными хвойными древостоями в верховьях рек, характерны сильноокислая реакция среды и низкое содержание в почве азота, кальция и калия (Сапожников и др., 1993). Последнее влияет на зольный состав хвои и более низкое по сравнению с КШ содержание  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{K}^+$  в водах под ПЕ древостоями. Количество поступивших под полог леса  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{K}^+$  варьирует в интервале 2.5–13, 0.7–3.6 и 17–47 кг/га. Близкие результаты получены для горных лесов Китая и Чехии (Zhang et al., 2007; Markova et al., 2009). Эквивалентное содержание растворенного  $\text{Ca}^{2+}$  в общем балансе ионов колеблется в пределах 13–16 % и мало изменяется как по сезонам, так и по площади бассейна. Рост концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  в кроновых водах регулярно фиксируется весной, что связано со смывом накопившейся на хвое и листьях терригенной пыли. Летом  $\text{Ca}^{2+}$  интенсивно потребляется древостоями и его концентрация снижается в 2–3 раза. Доля калия в катионном составе КВ примерно одинакова и составляет 44–47 % во ВБ и ПЕ сообществах, 51–53 % — в смешанных. Весомый вклад калия в КВ многие исследователи объясняют его мобильностью, причем большая часть  $\text{K}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , по данным, например, работы (Miller et al., 1987), выщелачивается из листвы, а  $\text{Ca}^{2+}$  — поступает с дождевыми водами. Основная часть  $\text{K}^+$  находится в тканях в ионной форме в клеточном соке и не связана с

**Таблица 4.** Валовое поступление (кг/га) питательных веществ под полог леса

| Лесные сообщества | $\text{HCO}_3$ | Cl   | $\text{SO}_4$ | $\text{NO}_3$ | Ca   | Mg   | K    | Na   | Si   | $C_{\text{орг}}$ |
|-------------------|----------------|------|---------------|---------------|------|------|------|------|------|------------------|
| ВБ                | 9.34           | 3.02 | 6.44          | 4.28          | 3.37 | 1.16 | 15.0 | 0.69 | 0.43 | 74.6             |
| ВХЛ               | 2.05           | 3.36 | 9.64          | 3.38          | 5.27 | 1.31 | 19.8 | 0.75 | 0.66 | 95.2             |
| КШ                | 33.2           | 8.40 | 11.1          | 1.80          | 10.3 | 3.26 | 39.6 | 1.43 | 1.49 | 149              |
| ПЕ                | 1.59           | 5.59 | 10.7          | 2.23          | 6.08 | 1.21 | 18.8 | 1.21 | 0.81 | 168              |



**Таблица 5.** Водная миграция главных ионов, кремния и органического углерода во вторичных хвойно-лиственных лесах в июне–сентябре 2014 г.

| Тип вод         | HCO <sub>3</sub> | Cl   | SO <sub>4</sub> | NO <sub>3</sub> | Ca   | Mg   | K     | Na   | Si    | C <sub>орг</sub> |
|-----------------|------------------|------|-----------------|-----------------|------|------|-------|------|-------|------------------|
|                 | кг/га            |      |                 |                 |      |      |       |      |       |                  |
| Дождевые        | 0.45             | 2.26 | 7.78            | 4.90            | 1.82 | 0.26 | 1.71  | 1.00 | 0.06  | 10.9             |
| Кроновые        | 3.55             | 4.82 | 11.53           | 4.32            | 6.93 | 1.75 | 27.23 | 1.17 | 0.70  | 99.0             |
| Подстилочные    | 15.8             | 1.78 | 3.07            | 15.4            | 12.6 | 2.89 | 13.7  | 0.13 | 1.39  | 90.7             |
| Лизиметрические | 4.03             | 1.04 | 10.84           | 5.58            | 4.31 | 0.78 | 2.29  | 2.24 | 10.73 | 4.05             |

органическим веществом. Элемент легко выщелачивается из крон древостоев и наряду с азотом в значительных количествах ретранслируется внутри дерева (Титлянова, 2014). Существенные различия поступления калия под полог вторичных и коренных сообществ наблюдаются в период активной вегетации. Уже к августу вымывание K<sup>+</sup> из крон выравнивается и достигает под вторичными и коренными древостоями 4–12 и 5–18 кг/га за сезон соответственно. Концентрация магния, натрия и кремния в осадках под кронами меняется в меньшей степени и составляет около 6 и 2 %-экв. от общего баланса макроэлементов соответственно.

По отношению к атмосферным осадкам концентрация анионов в большей мере повышается под влиянием хвойных коренных сообществ (см. табл. 3). Значительная сорбирующая поверхность и способность сосновых древостоев поглощать серу из воздуха (Алексеев, 1990) увеличивают содержание сульфатов под пологом КШ лесов на 24–33 % весной и на 35–46 % осенью. Из полога ПЕ и вторичных лесов сульфатов вымывается на 3–7 % меньше, чем из крон КШ древостоев. Нитрат-ионы в водах, прошедших через кроны в летний период, нередко отсутствуют, или обнаруживаются только их «следы», что свидетельствует об активном поглощении азота древесной растительностью в период вегетации. Динамика хлоридов в кроновых водах одинакова для всех древесных сообществ: наблюдается постепенное увеличение концентрации от весны к осени пропорционально продолжительности сухого периода ( $R = 0.47$ ). Больше всего Cl<sup>-</sup> аккумулируется на кронах высокополнотных сообществ (см. табл. 4). В КВ осенью содержание Cl<sup>-</sup> было в 3–10 раз больше, чем в дождевых водах на поляне. Связано это, вероятно, с его накоплением на кронах в периоды прохождения воздушных масс с морского побережья.

Почвенные воды характеризуются значительной внутрипрофильной изменчивостью. Пройдя сквозь древесный полог, атмосферные

осадки поступают на первый фильтрующий слой – поверхность лесной подстилки. Воды из-под подстилок изучали только во вторичном хвойно-лиственном лесу в 2014 г. Мощность подстилок составила 4–6 см, запас – около 3 т/га. Подстилочные воды более минерализованы, слабокислые с pH 5.6–6.3, имеют четко выраженный гидрокарбонатно-нитратный состав (табл. 5).

Содержание Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и Si в водах подстилки в 1.5–3 раза, а концентрация нитрат-иона в 4–8 раз выше, чем в кроновых водах вторичного хвойно-лиственного леса. Баланс C<sub>орг</sub> за сезон 2014 г. был меньше, но оставался близким к значениям, полученным для кроновых вод. Натрий, сульфат- и хлорид-ионы закрепляются в подстилке, остальные мигрируют в нижние почвенные горизонты.

В качестве приходной части баланса вещества рассматриваются атмосферные воды, так как химическая нагрузка кроновых вод сопряжена с круговоротом веществ в системе почва–растительность. Инфильтрация атмосферных осадков в почвенном горизонте сопровождается снижением биогенных элементов и увеличением в 1.5–2.5 раза содержания кремния и натрия (табл. 6).

Элементы питания вовлекаются в процессы биологического поглощения корнями растений и частично закрепляются в минеральной части почвенного горизонта (Аржанова, Елпатьевский, 2005). Постоянное образование гидрокарбонатов, нитратов и сульфатов обеспечивается за счет минерализации органического вещества. Нитраты активнее иммобилизуются живыми организмами, чем сульфаты (Лукина, Никонов, 1998), что приводит к более существенному снижению концентрации NO<sub>3</sub> в водах минерального горизонта.

Геохимический тип почвенных вод меняется на сульфатный или гидрокарбонатно-сульфатный натриево-кальциевый. Большая часть атмосферного NO<sub>3</sub> и C<sub>орг</sub> фиксируется в пределах корнеобитаемого слоя (см. табл. 5 и 6), усваи-

**Таблица 6.** Поступление с атмосферными осадками органических и минеральных веществ (кг/га) на поверхность лесного водосбора и вынос их почвенными и речными водами в теплый период 2011–2014 гг.

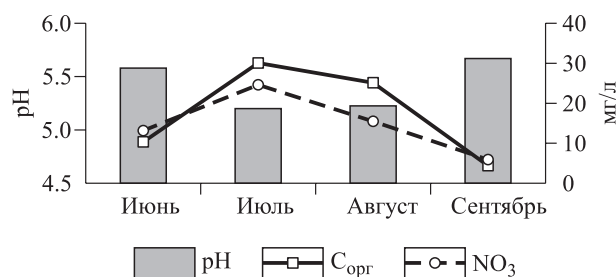
| Тип вод                          | HCO <sub>3</sub> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> | NO <sub>3</sub> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | Si   | C <sub>орг</sub> |
|----------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|------|------------------|
| Дождевые                         | 1.80             | 2.40            | 8.70            | 6.40            | 1.60             | 0.20             | 2.40           | 0.60            | 0.10 | 10.30            |
| <i>Экспериментальный бассейн</i> |                  |                 |                 |                 |                  |                  |                |                 |      |                  |
| Почвенные                        | 10.00            | 1.23            | 9.57            | 1.75            | 4.37             | 0.76             | 1.36           | 2.11            | 7.42 | 5.00             |
| Речные                           | 2.95             | 0.90            | 10.10           | 2.75            | 3.37             | 0.59             | 1.50           | 1.75            | 7.51 | 3.61             |
| <i>Резервный</i>                 |                  |                 |                 |                 |                  |                  |                |                 |      |                  |
| Почвенные                        | 9.44             | 1.37            | 16.10           | 9.72            | 5.63             | 1.07             | 2.90           | 4.00            | 12.3 | 12.00            |
| Речные                           | 16.90            | 1.02            | 9.20            | 4.66            | 6.81             | 0.83             | 1.23           | 3.27            | 9.08 | 5.86             |
| <i>Еловый, устье</i>             |                  |                 |                 |                 |                  |                  |                |                 |      |                  |
| Почвенные                        | 10.80            | 0.99            | 7.58            | 1.79            | 4.41             | 0.61             | 0.97           | 2.23            | 6.88 | 4.00             |
| Речные                           | 10.20            | 0.75            | 6.87            | 1.78            | 3.93             | 0.50             | 0.99           | 2.35            | 7.69 | 3.21             |

вается древостоями и активно участвует в биогенных процессах. Концентрация C<sub>орг</sub> сокращается в 3–7 раз, и происходит подщелачивание почвенных вод до pH 5.95–6.66.

В бурой горно-лесной почве под широколиственно-елово-кедровым лесом содержание азота в минеральном горизонте больше, чем в других почвах ВУС (Сапожников и др., 1993). Для вод подобных почв на водосборе руч. Резервный зафиксированы самые высокие концентрации C<sub>орг</sub> и нитратов. Воды их кислые, нитратные магниево-кальциевые. Содержание C<sub>орг</sub> составляет 1.5–4 ммоль/л, что на порядок выше, чем для большинства отобранных почвенных вод. Кислотность нитратных типов вод равна 4.64–5.67 и имеет обратную зависимость от содержания нитрат-ионов и органического углерода (рис. 5).

Коэффициент корреляции (*n* = 30) составил –0.67 и –0.86 соответственно.

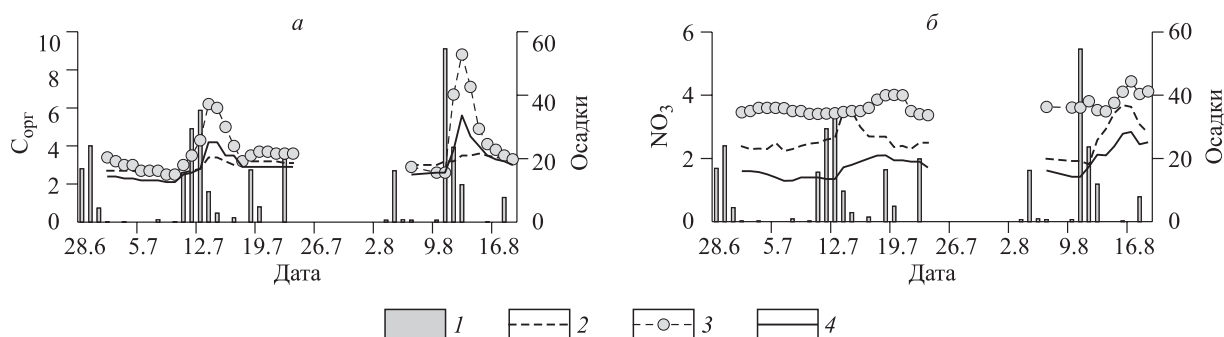
Ниже корнеобитаемого слоя хвойных древостоев выносятся около 2 кг/га C<sub>орг</sub> и более 3 кг/га нитратов. В водах руч. Резервный средняя концентрация нитрат-иона составила 3.7 мг/л, что на 30–46 % выше, чем в верхней и устьевой части руч. Еловый. Выпадение дожде-



**Рис. 5.** Кислотность почвенных вод под елово-кедровым лесом, содержание в них органического углерода (C<sub>орг</sub>) и нитратов (NO<sub>3</sub>) в летне-осенний период 2014 г.

вых осадков сопровождается дополнительным выносом органических веществ из почвенных горизонтов и дальнейшим повышением концентраций C<sub>орг</sub> и NO<sub>3</sub> в реках (рис. 6).

Устойчивое снижение содержания кальция, кремния, сульфатов и увеличение растворенного органического вещества и нитратов установлено в ходе анализа ионного состава вод руч. Еловый в 2011–2012 гг. (Болдескул и др., 2014). Наиболее вероятным источником поступления сульфатов в реки авторы считают глубокие почвенно-грунтовые воды, нитратов – верхние почвенные горизонты. Пространственная вариабельность



**Рис. 6.** Изменение концентрации (мг/л) органического углерода (а) и нитрат-ионов (б) в период прохождения циклонов в июле и августе 2014 г. 1 – осадки, мм; 2 – ЭБ; 3 – руч. Резервный; 4 – руч. Еловый, устье.

концентрации  $\text{SO}_4$  в почвенных водах исследуемого бассейна может быть следствием локально высокого содержания сульфатных минералов в осадочных породах или десорбции серы, ранее накопленной в иллювиальном горизонте почвы за счет атмосферных и кроновых выпадений (Аржанова, Елпатьевский, 2005). Основными поглотителями атмосферных сульфатов являются органогенные горизонты почвы. В подстилке ВХЛ аккумулируется  $\sim 70\%$  сульфатов, поступивших с кроновыми водами (см. табл. 5).

Почвенные и речные воды, дренирующие склоны с почвами под кедрово-еловыми типами леса, по содержанию сульфатов сопоставимы с данными, приведенными для северо-таежных фоновых еловых и сосновых лесов (Лукина, Никонов, 1998) и ельников начальной стадии техногенного разрушения (Евтюгина, Асминг, 2013). Для ЭБ и водосбора руч. Резервный выявлен незначительный вынос сульфатов за пределы бассейна (см. табл. 6). Гидрокарбонатный состав вод, сформированный кронами лесных сообществ (см. табл. 3), сохраняется на всем миграционном пути в водосборах, покрытых преимущественно широколиственно-кедровыми лесами. Химический состав рек стабилизируется по мере увеличения дренирующей площади и становится сульфатно-гидрокарбонатным натриево-кальциевым. Вынос из экосистемы руч. Еловый гидрокарбонатов и кальция компенсируется их приходом с кроновыми водами КШ сообществ. Баланс  $\text{K}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в бассейнах положительный, хотя, согласно работе (Перельман, Касимов, 1999), хлор является активным водным мигрантом. Натрий в отличие от тесно связанного с ним хлора выносится за пределы бассейна. Кислотность речных вод нестабильна, и явной зависимости рН от макроэлементного состава не обнаружено. В ЭБ значения рН 5.6–6.3 зафиксированы в 72 % отобранных проб. Величина рН в устьевой части ручья и его притоке (руч. Резервный) относительно постоянна и составляет 6.18–7.15 ед. Минимальные значения кислотности часто фиксируются в период интенсивного оттаивания сезонной мерзлоты и в паводковые периоды, вызванные циклоном с количеством сульфатов в дождевых водах более 5 мг/л.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопряженный геохимический мониторинг природных вод в горном лесном бассейне дает представление о формировании химического состава речных вод на участках с различной

структурной организацией лесных сообществ. Влияние лесной растительности на химический состав ландшафтных вод начинает проявляться в бассейне уже на входе с атмосферными осадками.

В течение периода вегетации с входными потоками влаги поступает от 5 до 14 т минеральных и от 2 до 6 т органических веществ. Поступающие атмосферные осадки кислые, сульфатно-кальциевые. Содержание  $\text{H}^+$ -иона коррелирует с сульфат- и нитрат-ионами и в среднем за сезон составляет 35 % от суммы катионов.

Модули поступления  $\text{K}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  близки по значению, но их дальнейшая миграция в биогеоценозе различна. Основное количество  $\text{Ca}^{2+}$  формируется в почвенном профиле. Элемент активно участвует в биологическом круговороте и в процессе водной миграции с 1 га площади бассейна с речными водами выносится от 3 до 7 кг кальция за сезон. Калий активно вымывается из крон древостоев и подстилки. Его миграционная активность ослабевает на глубине почвы 20–40 см, и речными водами  $\text{K}^+$  выносится в небольших количествах.

Химическая нагрузка кроновых вод сопряжена с круговоротом веществ в системе почва–растительность и не рассматривается в качестве приходной части баланса вещества. Биогенный характер кроновых вод выражается в превышении органических веществ над минеральными. Диапазон концентрации  $\text{C}_{\text{орг}}$  в них варьирует за сезон в пределах 16–260 мг/л. Минеральная нагрузка создается растворением осажденных на кронах сульфатов и хлоридов, выщелачиванием из хвои и листвы калия, кальция и магния. Азот, поступивший в виде нитрат-иона, практически полностью поглощается надземной фитомассой древостоев.

Степень обогащения кроновых вод макроэлементами зависит от видового состава леса и возраста древостоев. Наиболее активно элементы выщелачиваются из крон старовозрастных древостоев. Геохимический тип вод смешанных коренных сообществ можно определить как гидрокарбонатный, остальных – сульфатный кальциево-калиевый.

Почва является основным источником кальция, магния, растворимых форм кремния, сульфатов. Видовая и возрастная структура леса оказывает влияние на формирование геохимического типа внутрипочвенных вод. Сульфатный или нитратный натриево-кальциевый тип вод формируется на водосборах с доминированием сомкнутых хвойных древостоев. В широко-

лиственно-кедровых биогеоценозах с хорошо развитым травяным ярусом и подлеском в почвенных водах доминирует гидрокарбонат кальция.

Речные воды отражают особенности химического состава почвенно-грунтовых вод и сохраняют стабильность катионного состава. Химический тип вод горного бассейна сопряжен с типом лесной растительности и от истока к устью может различаться по преобладающему аниону на уровне класса. Интенсивность биологического круговорота в наибольшей степени отражена в динамике состава вод рек элементарных водосборов. Здесь выше концентрация биогенных элементов, а тип вод определяется выносом из минерального горизонта почвы сульфатов и/или нитратов. Для элементарных водосборов с пихтово-еловыми и вторичными хвойно-лиственными лесами характерен сульфатный класс вод. На площади всего исследуемого бассейна доминируют кедрово-широколиственные леса, кроновые воды и почва которых богаты гидрокарбонатом кальция. Это определяет химический тип речных вод, который по мере увеличения площади бассейна становится более стабильным сульфатно-гидрокарбонатным натриево-кальциевым.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 14-05-00150, 16-05-00541) и целевой программы «Дальний Восток» (грант № 15-1-6-080).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А. А.* Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. 200 с.
- Алексеев В. А.* Изучение химических потоков микроэлементов на фоновом лесном водосборе северо-запада ЕТС // *Водн. ресурсы.* 1989. № 3. С. 91–96.
- Аржанова В. С., Елпатьевский П. В.* Геохимия, функционирование и динамика горных геосистем Сихотэ-Алиня (юг Дальнего Востока России). Владивосток: Дальнаука, 2005. 253 с.
- Арчегова И. Б., Кузнецова Е. Г.* Влияние древесных растений на химический состав атмосферных осадков в процессе восстановления среднетаежных лесов // *Лесоведение.* 2011. № 3. С. 34–43.
- Болдескул А. Г., Шамов В. В., Гарцман Б. И., Кожевникова Н. К.* Ионный состав генетических типов вод малого речного бассейна: стационарные исследования в Центральном Сихотэ-Алине // *Тихоокеанск. геол.* 2014. Т. 33. № 2. С. 90–101.
- Гавренков Г. И.* К характеристике почв Верхнеусурийского стационара // *Стационарные исследования в лесах Сихотэ-Алиня.* Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 18–25.
- Дымов А. А.* Химический состав водотоков в коренном еловом и производном лиственно-хвойном лесах // *Вода: химия и экология.* 2013. № 4. С. 97–101.
- Евтюгина З. А., Асминг В. Э.* Особенности формирования состава инфильтрационных вод в условиях аэротехногенного загрязнения // *Вестн. МГТУ.* 2013. Т. 16. № 1. С. 73–80.
- Елпатьевский П. В.* Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. М.: Наука, 1993. 253 с.
- Жильцов А. С.* Гидрологическая роль горных хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2008. 331 с.
- Кожевникова Н. К., Дюкарев В. Н.* Эколого-защитные свойства лесного покрова верхнего пояса гор // *Пробл. регион. экол.* 2011. № 4. С. 31–38.
- Кондратьев И. И., Кубай Б. В., Семькина Г. И., Качур А. Н.* Влияние трансграничного и природного факторов на химический состав осадков в Дальневосточном регионе России // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 10. С. 45–54.
- Копчик Г. Н., Лукина Н. В., Смирнова И. Е.* Влияние атмосферного промышленного загрязнения на состав почвенных растворов подзолов // *Почвоведение.* 2007. № 2. С. 223–234.
- Костенкова А. Ф.* Роль напочвенного покрова в круговороте зольных элементов лесных биогеоценозов юга Дальнего Востока // *Почвоведение.* 1976. № 4. С. 54–62.
- Лукина Н. В., Никонов В. В.* Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во Кольск. науч. центра РАН, 1998. 316 с.
- Луценко Т. Н., Аржанова В. С., Ким Н. Ю.* Трансформация растворенного органического вещества почвы на вырубках пихтово-елового леса // *Почвоведение.* 2006. № 6. С. 674–680.
- Муха Д. Э., Кондратьев И. И., Мезенцева Л. И.* Трансграничный перенос кислотных осадков циклонами Восточной Азии на юг Дальнего Востока России // *География и природ. ресурсы.* 2012. № 2. С. 21–26.
- Нецветаева О. Г., Онищук Н. А., Зимник Е. А., Сезько Н. П., Доля-Лопатина И. Н., Ходжер Т. В.* Динамика химического состава атмосферных осадков в Байкальском регионе // *Оптика атмосферы и океана.* 2012. Т. 5. № 6. С. 507–512.
- Никонов В. В., Лукина Н. В.* Влияние ели и сосны на кислотность и состав атмосферных выпа-

- дений в северо-таежных лесах индустриально развитого региона // Экология. 2000. № 2. С. 97–105.
- Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей, 1999. 768 с.
- Пристова Т. А. Влияние древесного полога лиственно-хвойного насаждения на химический состав осадков // Лесоведение. 2005. № 5. С. 49–55.
- Пристова Т. А. Компоненты углеродного цикла в лиственно-хвойном насаждении средней тайги // Лесоведение. 2010. № 6. С. 12–19.
- Робакидзе Е. А., Гормонова Н. В., Бобкова К. С. Химический состав жидких атмосферных осадков в старовозрастных ельниках средней тайги // Геохимия. 2013. № 1. С. 72–84.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. А. Д. Семенова. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 542 с.
- Сапожников А. П., Гавренков Г. И. О достоверности различий между почвами кедровников и ельников на Верхнеуссурийском стационаре // Комплексные исследования лесных биогеоценозов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 31–35.
- Сапожников А. П., Селиванова Г. А., Ильина Т. М., Дюкарев В. Н., Бутовец Г. Н., Гладкова Г. А., Гавренков Г. И., Жильцов А. С. Почвообразование и особенности круговорота веществ в горных лесах Южного Сихотэ-Алиня. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1993. 269 с.
- Селиванова Г. А. Биогеоценотическая характеристика лесных подстилок Южного Сихотэ-Алиня // Почвоведение. 1983. № 8. С. 100–110.
- Соколов А. А. Химический состав атмосферных осадков, прошедших сквозь полог елового и березового древостоя // Лесоведение. 1972. № 3. С. 103–106.
- Титлянова А. А. Универсальность процессов биотического круговорота // Почвоведение. 2014. № 7. С. 771–780.
- Чудаева В. А., Чудаев О. В., Юрченко С. Г. Особенности химического состава атмосферных осадков на юге Дальнего Востока // Водн. ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 60–71.
- Berger T. W., Untersteiner H., Schume H., Jost G. Throughfall fluxes in a secondary spruce (*Picea abies*) a beech (*Fagus sylvatica*) and a mixed spruce-beech stand // For. Ecol. Manag. 2008. V. 255. P. 605–618.
- De Schrijver A., Geudens G., Augusto L., Staelens J., Mertens J., Wuyts K., Gielis L., Verheyen K. The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review // Oecologia. 2007. V. 153. N. 2. P. 663–674.
- Huang L. M., Yang J. L., Zhang G. L. Chemistry and source identification of wet precipitation in a rural watershed of subtropical China // Chin. J. Geochem. 2012. V. 31. N. 4. P. 347–354.
- Likens G. E., Driscoll C. T., Buso D. C., Siccama T. G., Johnson C. E., Lovett G. M., Ryan D. F., Fahey T., Reiners W. A. The biogeochemistry of potassium at Hubbard Brook // Biogeochemistry. 1994. V. 25. P. 61–125.
- Likens G. E., Bormann F. H. Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. New York: Springer-Verlag, 1995. 159 p.
- Markova I., Drapelova I., Truparova S. Comparison of deposition fluxes on the open area and in mountain spruce stands of different density // J. For. Sci. 2009. V. 55. P. 395–402.
- Miller H. G., Miller J. D., Cooper J. M. Transformations in rainwater chemistry on passing through forested ecosystems // P. J. Coughtrey, M. H. Martin & M. H. Unsworth (Eds.). Pollutant Transport and Fate in Ecosystems. Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1987. P. 171–180.
- Zhang G., Zeng G. M., Du C. Y., Jiang Y. M., Su X. K., Xiang R. J., Huang L., Xu M., Zhang C. Deposition patterns in bulk precipitation and throughfall in a subtropical mixed forest in Central-South China // Forest. 2007. V. 80. P. 211–221.

## WATER MIGRATION OF MACROELEMENTS IN CONIFEROUS BROAD-LEAVED FORESTS OF SIKHOTE-ALIN

N. K. Kozhevnikova<sup>1</sup>, T. N. Lutsenko<sup>2</sup>, A. G. Boldeskul<sup>2</sup>, S. Yu. Lupakov<sup>2</sup>, V. V. Shamov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity,  
Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch  
Prospekt Stoletiya Vladivostoka, 159, Vladivostok, 690022 Russian Federation

<sup>2</sup> Pacific Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch  
Radio str., 7, Vladivostok, 690041 Russian Federation

---

E-mail: nkozhevnikova@ibss.dvo.ru, luts@tig.dvo.ru, boldeskul@tig.dvo.ru, rbir@mail.ru, vlshamov@yandex.ru

In the paper, the natural water chemical composition spatial variability studies results in the mountain forest catchment are presented. It's shown that the catchment biotic components' impact upon water chemical composition is detected even at input as atmospheric precipitation. The input fluxes are acid, sulfate ones with high ratio of hydrogen, potassium and dissolved organic matter. Diversity of ecotopic conditions determines the further transformation of natural water chemical composition. The role of tree crowns in the transformation increases while the crown closure and stands' age increase. According to macrocomponents transformation and rain acidity neutralization, forest associations form the sequence: mixed > coniferous > young deciduous ones. Dissolved organic carbon (DOC), potassium and calcium become the main components of water chemical composition, while sulfates dominate among anions. For vegetation period, 9–11 kg/ha of sulfates come below tree crown. Biogenic elements transport is gradually limited in soil profile at the migration stage. Sulfate-potassium composition throughfall in spruce-fir and secondary forests community transforms into sulfate-sodium-calcium. Hydrocarbonates predominate in soil water in broad-leaved-pine type of forest, and potassium output decreases 10 times. Geochemical type of river water keeps features of chemical composition of soil drained by river section. Negligible output of sulfates, hydrocarbonates and calcium from ecosystem is established for the headwaters. Negative balance of hydrocarbonates and calcium is compensated by significant input of these components with throughfall at catchments with predominantly pine-broad-leaved forest types.

**Keywords:** *mountain-forest basin, forest communities, throughfall, chemical composition of natural waters, water migration, soil water, geochemical water type.*

**How to cite:** Kozhevnikova N. K., Lutsenko T. N., Boldeskul A. G., Lupakov S. Yu., Shamov V. V. Water migration of macroelements in coniferous-broad-leaved forests of Sikhote-Alin // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Siberian Journal of Forest Science). 2017. N. 3: 60–73 (in Russian with English abstract).