

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЛАТЕРАЛЬНОГО СТОКА УГЛЕРОДА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТАХ ЮЖНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ

Н.К. Кожевникова¹, Т.Н. Луценко,² А.Г. Болдескул², С.Г. Юрченко²

¹ Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, пр. 100-летия Владивостока, 159, г. Владивосток, 690022, Россия. E-mail: nkozhevnikova@biosoil.ru

² Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, ул. Радио, 7, г. Владивосток, 690044, Россия. E-mail: boldeskul@yandex.ru

Представлены результаты натурных наблюдений за динамикой выноса растворенных форм углерода и биогенных элементов из речных водосборов с различной ландшафтной структурой. Выявлено потенциальное влияние различных типов лесных сообществ и гидрологического фактора на удержание или вынос биогенных элементов в пределах водосборной площади. Показано, что тенденция увеличения их концентраций и выноса наблюдается в ручьях в летние месяцы. Это связано с активизацией биогеохимических процессов внутри лесных сообществ и увеличением водности ручьев. Установлено, что наиболее контрастные изменения между ручьями проявляются в миграционной способности различных форм растворенного азота и растворенного органического углерода на их водосборах. В обоих ручьях доминирует органическая форма углерода, и ее вынос составляет 1070–2250 кг/км² за сезон (64–68 % от общего). Содержание общего азота в 3–4 раз выше в водах ручья, дренирующего склоны с коренными кедрово-широколиственными лесами. Такие различия связаны с высокими концентрациями в ручье нитратной формы азота (1,2–1,4 мгN/л). В водах ручья, дренирующего склоны с вторичными дубовыми лесами, в мае–июне доминирует аммонийный азот (0,2–0,4 мгN/л), в июле–сентябре – органический (0,3–0,4 мгN/л). Для более полного понимания биокруговорота на водосборах с различными ландшафтообразующими факторами необходим постоянный мониторинг, который будет полезен для выявления особенностей биогеохимических циклов внутри водосборных бассейнов.

SEASONAL DYNAMICS OF LATERAL CARBON AND NUTRIENT STREAM IN FOREST LANDSCAPES OF THE SOUTHERN SIKHOTE-ALIN

N.K. Kozhevnikova¹, T.N. Lutsenko², A.G. Boldeskul², S.G. Yurchenko²

¹ Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, 100-letiya Vladivostok Avenue, 159, Vladivostok, 690022, Russia. E-mail: nkozhevnikova@ibss.dvo.ru

² Pacific Geographical Institute FEB RAS, Radio St., 7, Vladivostok, 690041, Russia. E-mail: boldeskul@yandex.ru

The results of field study of the release dynamics of the dissolved species of organic carbon and biogenic elements from river catchments with different landscape structures are presented. The potential influence of various types of forest communities and the hydrological factor on the retention or output of biogenic elements within the catchment area has been revealed. It is shown that the tendency of concentrations increase and output is observed during the summer months. This is due to the activation of biochemical processes within forest communities and an increase in the water discharge. It has been established that the most contrasting changes between streams are manifested in the migration of various species

of dissolved nitrogen and dissolved organic carbon. In the both streams, the dissolved organic carbon dominates and its export amounts to 1070–2250 kg/km² per season (64–68 % of the total dissolved). The concentration of the total dissolved nitrogen is 3–4 times higher in the waters of the stream draining slopes with primary cedar-broadleaf forests. Such differences are associated with high concentrations (1,2–1,4 mgN/l) of nitrate in the stream. In the waters of the stream draining the slopes with secondary oak forests, ammonium nitrogen (0,2–0,4 mgN/l) dominates in May-June, and organic nitrogen (0,3–0,4 mgN/l) prevails in the July-September. For a more complete understanding of the biocycles in catchments with different landscape-forming factors, continuous monitoring is needed, which will be useful for identifying the peculiarities of biogeochemical cycles within basins.

Введение

Биогенные элементы играют важную роль в гидросфере и являются одним из индикаторов экологических изменений в водных экосистемах. Различия ландшафтообразующих факторов и гидрологического режима в бассейнах рек, антропогенные нагрузки отражаются не только на концентрациях биогенных веществ (БВ), но и на их соотношениях, что влияет на качество воды и трофический статус водоема (Шулькин и др., 2009; Шулькин, Никулина, 2015; Лозовик и др., 2017). В горно-лесных водосборах перенос растворенных биогенных элементов контролируется, в основном, гидрологическими и биогеохимическими процессами, происходящими в прилегающих к ручьям склоновых и долинных ландшафтах (Laudon et al., 2021). Ландшафтная структура малых водосборов обеспечивает большую вариативность химического состава почвенно-грунтовых вод, являющихся основным источником поступления воды и растворенных веществ в ручьи и реки (Аржанова, Елпатьевский, 2005; Губарева и др., 2019). Сезонные и межгодовые колебания в ручьях концентраций и экспорта растворенных форм углерода, азота, фосфора часто рассматриваются как диагностический признак наземного ландшафта, а такие характеристики как возраст подстилающих пород, структура почвы, уклон водосбора, состав леса оказывают доминирующее влияние на время и масштабы их выноса из экосистемы (Аржанова, Елпатьевский, 2005; Авессаломова и др., 2013; Ledesma et al., 2016). В частности, экспорт углерода ручьями может быть достаточно высоким и оказывать немаловажное влияние на оценку чистого углеродного баланса экосистемы (Raymond, Saiers, 2010). Многочисленные исследования показали также существенную роль гидрологического режима и регионального климата в переносе и преобразовании биогенных элементов (Шулькин и др., 2009; Lee et al., 2016; Drake et al., 2018). Гидрологический фактор оказывает влияние на продуктивность водоемов и на формирование биологического разнообразия речных сообществ (Богатов и др., 2013). В последние десятилетия установлены значимые тренды увеличения концентрации биогенных элементов в ручьях и реках (Monteith et al., 2007; Шулькин и др., 2021), что требует оценки влияния гидрологических и биогеохимических процессов на латеральный вынос питательных веществ из водосборных бассейнов с различными ландшафтными условиями. Сравнительный анализ между различающимися водосборными бассейнами с минимальной антропогенной нагрузкой позволит получить фоновые показатели гидролого-гидрохимического мониторинга и применять их в качестве расчетных для прогнозирования возможных негативных последствий.

Целью данной работы было установить поступление в ручьи, дренирующие ландшафты с кедрово-широколиственными и дубово-липовыми лесами, органических и неорганических форм углерода и азота, кремния и общего фосфора, а также выяснить их содержание и вынос в различные сезоны года.

Сихотэ-Алинь служит основным водоразделом, отделяющим бассейн р. Уссури от бассейнов рек, впадающих в Японское море. Горный рельеф, муссонный климат и высокая лесистость водосборных бассейнов определяют значительную густоту гидрографической сети, основу которой составляют малые реки и ручьи (Ресурсы..., 1972). Ландшафтообразующим компонентом речных бассейнов Сихотэ-Алиня являются разнообразные по видовому и возрастному составу леса (Богатов и др., 2000). Лесные сообщества с преобладанием кедра корейского и дуба монгольского покрывают около 46 % от всей лесной площади Приморского края (Петропавловский, 2016). Горные лесные экосистемы обладают высокими водоохранными и водорегулирующими свойствами и особенно важны в условиях муссонного климата (Жильцов, 2008). Наиболее эффективно гидролого-защитные функции выполняют кедрово-широколиственные леса, доля которых в составе экосистем Сихотэ-Алиня ежегодно снижается (Кожевникова, Дюкарев, 2011). Реки имеют преимущественно дождевое питание. Характерной особенностью их гидрохимического режима является выраженная сезонная изменчивость, обусловленная пространственно-временной неравномерностью выпадения осадков. Ландшафтно-климатические особенности, а также незначительная антропогенная нагрузка и гидроклиматическая изученность территорий (Горчаков, 1983; Жильцов, 2008) послужили условием выбора модельных объектов.

Материалы и методы

Наши исследования проводились в апреле–октябре 2024 г. в двух небольших горных ручьях, водосборы которых практически полностью покрыты лесом. Модельные бассейны расположены в южной и центральной частях Приморского края, различаются по ландшафтно-климатическим характеристикам (табл. 1) и относятся к водосборам разных морей. Ручей Березовый (44° 2'16.93" с. ш. 134°12'21.94" в. д.) протекает по территории Верхнеуссурийского стационара ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН (ВУС). Его бассейн расположен в поясе среднегорных хвойно-широколиственных лесов и входит в систему верховьев

Таблица 1

Ландшафтно-климатические характеристики исследуемых бассейнов

Характеристики/Ручей	Березовый	Дегтярева
Площадь водосбора, км²	3,9	8,5
Среднегодовое количество осадков, мм	820	760
Высота максимальная, м. абс	1075	316
Высота средняя, м.абс.	813	125
Уклон склонов, градус	25–40	7–25
Почвообразующие породы	Контакт юрских и триасовых отложений: туфы, базальты, андезиты, дациты	Палеозойские отложения среднего и основного состава: риолиты и их туфы, туфолавы, дациты, андезиты, базальты, граниты
Преобладающий тип почвы	Буроземы типичные; ржавоземы грубогумусовые иллювиально-гумусированные	Буроземы оподзоленные; буроземы типичные
Лесная формация	Хвойно-широколиственная	Широколиственная

р. Уссури, питающей бассейн Амура (Сапожников и др., 1993; Болдескул и др., 2014). Ручей Дегтярева (верховья р. Комаровка: 43°42'9.35" с. ш. 132°9'34.93" в. д.) относится к бассейну рек Японского моря. Водосбор ручья расположен на северных склонах вблизи Горнотаежной станции ДВО РАН и покрыт вторичными дубовыми лесами, которые восстановились на месте чернопихтово-широколиственных лесов, пройденных рубками и пожарами в 1940–1950-е годы (Москалюк, 2022). Рельеф низкогорный, почвы отнесены к буроземам типичным, которые в пределах бассейна морфологически отличаются мощностью генетических горизонтов и степенью каменистости (Бугаец и др., 2015; Жарикова, Голодная, 2024). Климат районов исследования определяется влиянием восточноазиатского внутритропического муссона. Более 80 % атмосферных осадков выпадает в теплый период года. Их среднегодовое количество в бассейнах немного различается (табл. 1), что связано с неравномерностью их выпадения по территории Приморского края в летний и зимний периоды (Горчаков, 1983; Жильцов, 2008). Суточные максимумы дождевых осадков 100 мм и более установлены в обоих районах во второй половине лета и осенью.

Пробы речных вод на химический анализ отбирались в различные периоды увлажнения в течение теплого сезона одновременно с измерением расхода воды. В день отбора в нефилтрованных пробах измеряли pH и определяли общую щелочность методом потенциометрического титрования (Руководство..., 1977), полагали, что величина общей щелочности обусловлена, в основном, концентрацией гидрокарбонат-иона. Пробоподготовка воды включала вакуумную фильтрацию с помощью мембранных фильтров (PVDF, Южная Корея) с размером пор 0,45 мкм. Анализ растворенных макрокомпонентов выполнялся в Центре ландшафтной экодиагностики и ГИС-технологий ТИГ ДВО РАН с учетом необходимых методических требований. Содержание кремния и фосфора определяли методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (Plasma3000, NCS China). Концентрацию растворенного органического углерода определяли на ТОС-анализаторе с ИК-регистрацией (Shimadzu, TOC-V_{CNP}). Содержание аммонийного азота устанавливали спектрофотометрическим методом с реактивом Несслера, нитратного и нитритного азота – методом ионной хроматографии на жидкостном хроматографе Shimadzu LC10Avp. Общий азот устанавливали из нефилтрованной пробы методом окислительного сжигания на ТОС-анализаторе с детектированием хемилюминесцентного излучения в Испытательной лаборатории ФГБУ «Приморское УГМС». Содержание органического азота находили по разности между концентрациями общего и минерального (сумма концентраций аммония, нитратов и нитритов) азота.

Гидрометрические и метеорологические показатели были измерены непосредственно в пределах водосборной площади обоих ручьев. Более детальные наблюдения велись в бассейне руч. Березовый (рис. 1). Здесь для измерения погодных и гидрологических данных в середине апреля были установлены метеостанция и уровнемер с непрерывной регистрацией данных, измерялся расход при каждом отборе проб. Суточные расходы воды были получены с помощью кривых связи расхода и уровня. В бассейне руч. Дегтярева проводились «ручные» измерения суммарного количества осадков с помощью осадкомера Третьякова в периоды отбора проб на химический анализ, эпизодически измерялись расходы воды. Речной сток за сезон рассчитывался с учетом гидрометрических показателей рек-аналогов, расположенных в верховьях бассейна р. Комаровка (Горчаков, 1983). Впоследствии расчетные данные по расходу воды и осадкам будут уточняться по близлежащей станции Приморская, где с 2003 г. рядом с гидрологическим постом «Центральный»

ведутся наблюдения за химическим составом атмосферных осадков и речных вод в рамках международной программы EANET (Zhigacheva et al., 2022).

Результаты и обсуждение

В апреле–октябре 2024 г. были установлены существенные (в 1,5–3 раза) различия по количеству выпавших осадков, как внутри сезона, так и между районами наших исследований (рис. 2). Содержание растворенных веществ в атмосферных осадках незначительно, но они являются основным источником минерального азота, фосфора (Савенко, Савенко, 2007; Лозовик и др., 2017). РОУ – доминирующий компонент дождевых вод в горно-лесных бассейнах (Кожевникова и др., 2022). Нагрузка РОУ создается в дождевых водах, преимущественно, низкомолекулярными органическими кислотами такими, как муравьиная, уксусная и др., которые выделяются при транспирации наземной растительности (Свистов, 2015). Сопоставление модулей поступления РВ с атмосферными осадками и их удельного выноса с речными водами позволяет оценить баланс элементов и его специфику в различные сезоны и годы (Елпатьевский, 1993; Кожевникова и др., 2017). За теплый сезон на водосборную площадь обоих бассейнов поступает примерно равное количество растворенных форм органического углерода и азота – около 2 т РОУ/км² и 0,3 тN_{орг}/км², а по поступлению минерального азота бассейны различались почти в 2 раза (рис. 2, В, Г). В течение сезона на водосборную площадь руч. Дегтярева с дождями поступало существенно больше (в 5–6 раз) фосфора и кремния.

Различия в характере выпадения осадков отразились на динамике расхода воды и латерального стока биогенных элементов. В руч. Березовый с апреля и до начала сентября сохранялась повышенная водность. Более 55 % всего сезонного стока было сформировано двумя паводками в период с 18 июля по 3 сентября (рис. 1). В бассейне руч. Дегтярева распределение стока в течение теплого периода было более равномерным (рис. 2, Б). Средние паводки наблюдались весной, а также в июле и августе.

Воды ручьев слабоминерализованные, сульфатно-гидрокарбонатные, в руч. Березовый – слабокислые, в руч. Дегтярева – нейтральные. Общая минерализация в течение исследуемого года изменялась от 24 до 43 мг/л. Низкая величина минерализации речных вод свидетельствует об их атмосферном генезисе, а также о слабой степени химической денудации подстилающих пород (Аржанова, Елпатьевский, 2005). Доминирование концентраций сульфат- и гидрокарбонат-ионов связано с их атмобактериальным происхождением. Гидрокарбонат-ион связан с величиной рН исследуемых вод, так же, как и основные катионы, поступающие в воды при выветривании горных пород. На нейтрализацию щелочности расходуется также углекислый газ, наиболее вероятным источником которого является деструкция органических соединений, выносимых из почвенных горизонтов (Елпатьевский, 1993). Высокое содержание сульфатов в речной воде может быть вызвано избыточным атмосферным осаждением серы на водосборную площадь (Кожевникова и др., 2022), процессами разложения органического вещества и наличием на водосборах сульфидсодержащих минералов. В катионном составе ручьевых вод доминирует натрий (рис. 3). Подобная доля содержания натрия в составе вод была установлена в реках, протекающих в антропогенных ландшафтах Приханкайской равнины (Луценко и др., 2013).

Основной вклад в формирование речного и гидрохимического стока вносят почвенно-грунтовые воды. В наиболее значимые фазы водного режима основная часть воды (от 50 % до 90 %) и растворенных элементов попадает в ручьи из верхних

горизонтов почв, протекая по сети неглубоко залегающей склоновой дренажной сети. Доля дождевых вод в гидрографе стока минимальна. (Губарева и др., 2019; Гарцман и др., 2020). Результаты параллельного отбора проб из дренажной сети и русла ручья могут быть подтверждением поступления растворенных биогенных элементов со склоновыми водами. На рисунке 4 показано, что концентрации растворенных форм органического и неорганического углерода, нитратного азота и кремния в склоновых (дрена) и речных водах имеют близкие величины. Период повышенной водности в ручьях характеризуется относительно высоким выносом органических и минеральных соединений из верхних горизонтов почв. Как будет показано ниже, гидрологический фактор в большей степени отражается на концентрациях растворенных органических форм углерода и азота. Базисный сток преобладает в межпаводковые периоды и зимой. В летне-осеннюю межень формирование состава вод происходит в большей степени в минеральных горизонтах почв и в зоне трещиноватости коренных пород, что определяет более высокую концентрацию элементов основного ионного состава и кремния (Болдескул и др., 2014; рис. 3).

Динамика латерального стока углерода и биогенных элементов

Растворенное органическое вещество (РОВ) природных ландшафтов – сложный комплекс разнообразных органических соединений почвенно-растительного происхождения, таких, как, фульво- и гуминовые кислоты, а также индивидуальных соединений, представленных углеводами, органическими кислотами, белками, фенолами и т. д. Помимо этого, в природных водах поставщиком органического вещества является первичная продукция водных организмов. Присутствие всех этих многообразных, сложных для химического анализа веществ, принято оценивать концентрацией растворенного органического углерода (РОУ). Другой формой растворенного в водах углерода считается углерод неорганических соединений (РНУ), преимущественно, продуктов растворения горных пород. Этот источник неорганического углерода пополняется также за счет почвенного дыхания, представляющего собой поток углекислого газа, образующегося в почве при разложении органических остатков (Кудеяров, 2023).

Диапазоны варьирования растворенного органического и неорганического углерода в течение сезона тесно связаны с водным режимом (табл. 1). Максимальные концентрации РОУ наблюдаются в периоды высоких вод, что связано с его вымыванием из органогенных горизонтов почвы. Более высокое содержание РНУ установлено в меженный период. Это свидетельствует о его преимущественном поступлении из глубоких почвенных горизонтов. Латеральный сток обеих форм растворенного углерода выше в многоводный период. В течение теплого сезона 2024 г. концентрация РОУ в ручьевых водах была относительно высокой и варьировала в диапазоне от 3 до 7 мг/л. Концентрация входит в диапазон (1–10 мг/л), характерный для пресноводных систем и сопоставима с данными, полученными для небольших залесенных водосборов умеренной зоны (Raymond, Saiers, 2010; Луценко и др., 2021; Liu, Wang, 2022). Ручьи схожи по концентрации и сезонной динамике растворимых форм углерода (табл. 1). Среднее за сезон содержание общего углерода в ручьевых водах составило около 5 мг/л. В обоих ручьях доминирует органическая форма углерода и составляет 56–78 % от общего. Латеральный сток углерода колебался от 0,14 до 1,3 тС/км² в месяц (табл. 2). Максимальный экспорт растворенных форм углерода наблюдался в руч. Березовый, что связано с прохождением высоких паводков в июле и августе (рис. 1). В небольших водосборных бассейнах даже разовые, но крупные дождевые события могут вносить

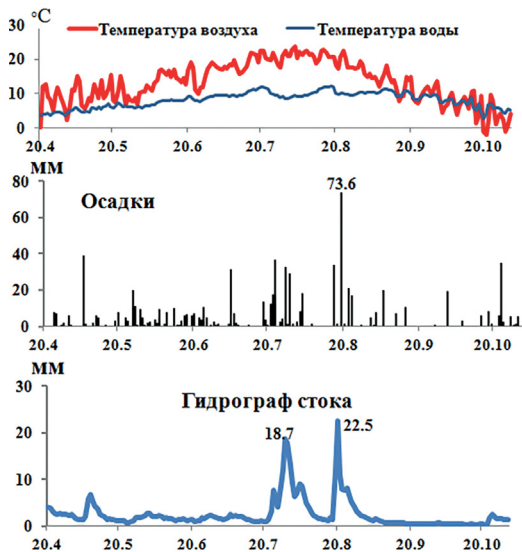


Рис. 1. Динамика гидрометеорологических параметров в бассейне руч. Березовый за апрель–октябрь 2024 г.

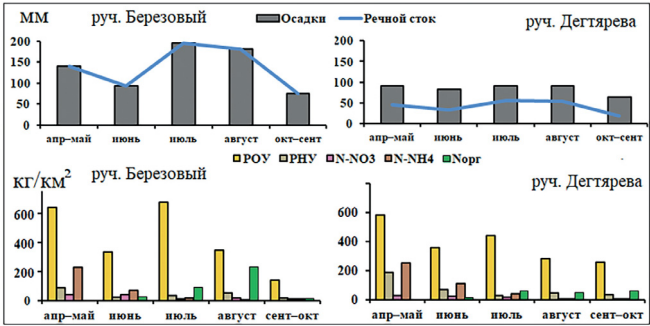


Рис. 2. Сезонное распределение дождевых осадков, речного стока в исследуемых бассейнах. Вынос растворенных форм углерода и азота с водами ручьев Березового и Дегтярева

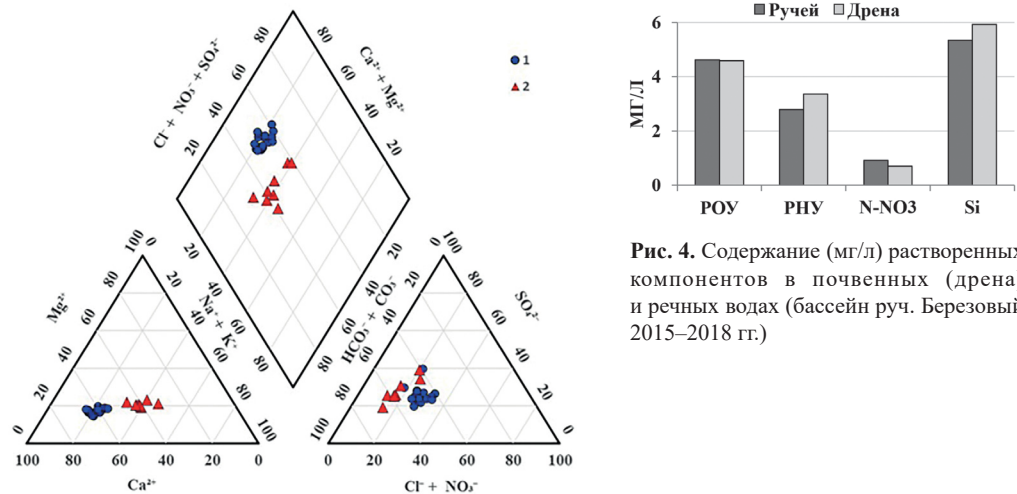


Рис. 3. Диаграмма Пайпера, представляющая соотношение главных ионов в%-эквивалентах в ручьях: 1 – руч. Березовый; 2 – руч. Дегтярева

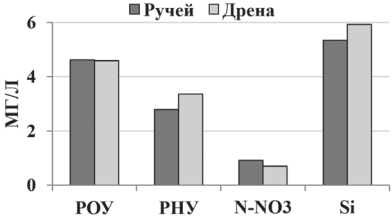


Рис. 4. Содержание (мг/л) растворенных компонентов в почвенных (дрена) и речных водах (бассейн руч. Березовый 2015–2018 гг.)

Таблица 2

Средневзвешенное содержание биогенных элементов (мг/л) в водах ручьев Березового (1) и Дегтярева (2) в период с 20 апреля по 15 октября 2024 г.

Компонент	Апрель–май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь–октябрь		Сезон	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
POУ	4,60	6,05	4,30	5,00	6,77	5,00	5,56	4,63	3,88	4,60	5,02	5,20
РНУ	2,09	1,96	2,42	2,81	1,91	2,10	2,38	3,14	3,08	3,68	2,38	2,90
N-NO ₃	1,44	0,09	1,23	0,05	1,26	0,07	1,30	0,08	1,53	0,05	1,27	0,05
N-NH ₄	0,78	0,38	0,11	0,20	0,14	0,05	0,45	0,05	0,09	0,04	0,29	0,11
N _{орг}	0,06	0,02	0,08	0,21	0,27	0,44	0,14	0,35	0,44	0,38	0,17	0,31
P	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Si	4,56	6,79	4,57	7,44	4,72	7,76	4,67	8,19	5,17	8,18	4,78	7,59

значительный вклад в ежегодный экспорт РОУ, при этом масштаб паводка зачастую важнее, чем его частота (Raymond, Saiers, 2010). За теплый период экспорт РОУ со стоком руч. Березового составил более 2 тС/км², а РНУ около 1 тС/км². Латеральный сток углерода в бассейне ручья превысил его поступление с дождевыми водами. Вынос общего углерода за пределы бассейна составил более 3 т за сезон. Сток растворенного углерода в руч. Дегтярева был в 2 раза ниже (табл. 2), при этом баланс РОУ был положительным, РНУ – отрицательным. В целом, в бассейне ручья за апрель–октябрь установлено накопление около 4 т общего углерода. Опубликованные материалы по величине первичной продукции органического вещества (Сапожников и др., 1993) и полученные в 2024 г. данные о почвенном дыхании в кедрово-широколиственных лесах (Куприн, Тюнин, 2024) позволили рассчитать, что приток растворенного углерода с поверхности водосбора руч. Березовый за сезон составляет примерно 6 % от наземной чистой продукции бассейна. Аналогичные расчеты в других ландшафтах показали, что годовой приток углерода во внутренние водоёмы из наземных экосистем может варьировать от 12 % до 34 % от наземной чистой первичной продукции (Drake et al., 2018).

Азот является важнейшим биогенным элементом, включенным во все живые организмы. Особенность азота – в разнообразии минеральных форм (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, N₂), ставших результатом микробиологических процессов. Соединения азота образуются и транспортируются в почве, благодаря процессам азотфиксации, аммонификации, нитрификации (Смагин, 2000). Наличие аммония в природных водах связано с минерализацией органического вещества и деструкцией белковых соединений. Рост концентраций аммонийного азота наблюдается в периоды массового отмирания водных организмов, особенно в зонах их скопления, в придонных слоях.

Сезонная изменчивость различных форм азота выражена в исследуемых водах наиболее контрастно (табл. 2). Установлено, что содержание общего азота в водах руч. Березовый в 3–4 раз выше, чем в водах руч. Дегтярева. Такие различия связаны с более высокими концентрациями в ручье нитратной формы азота. В водах руч. Дегтярева в мае–июне доминирует аммонийный азот, в июле–сентябре – органический, доля нитратного азота не превышает 20 % от общего. Содержание форм азота в весенне-раннелетний период отражает равновесие процессов разложения органического вещества и последующего поглощения элементов как наземной, так и водной биотой. Усиление биотического поглощения в водотоках в теплый период приводит к минимальному содержанию нитратной и аммонийной формы азота

Таблица 3

**Вынос растворенных форм углерода и биогенных элементов (кг/км²)
с водами ручьев: 1 – Березового, 2 – Дегтярева.**

Компонент	Апрель–май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь–октябрь	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
POY	451	272	224	164	846	275	940	251	116	89,7
PHY	205	88,2	126	92,2	239	116	402	170	92	71,8
N-NO ₃	141	4,05	64	1,64	158	3,86	220	4,33	46	0,98
N-NH ₄	78,4	17,1	5,72	6,56	17,5	2,75	76,1	2,71	2,70	0,78
N _{орг}	13,7	0,90	7,80	6,9	33,8	24,2	10,1	18,9	4,20	7,41
P	0,98	0,90	0,52	0,66	1,25	1,10	3,38	0,54	0,30	0,20
Si	447	306	238	244	590	427	789	443	155	160

(Луценко и др., 2013). Тенденция увеличения концентрации и выноса растворенных форм общего азота наблюдалась в обоих ручьях в июле–августе (табл. 3). За сезон с водами ручьев Березовый и Дегтярева выносилось, соответственно, около 700 и 30 кг/км² минерального азота, а также 80 и 64 кг/км² органического азота. На обоих водосборах органический и аммонийный азот, поступивший с дождями, удерживается в небольших количествах биогеоценозом. Баланс нитратного азота различен. Бассейн руч. Березовый служит источником нитратного азота, с его водами выносятся за пределы водосбора более 1,5 т N-NO₃⁻ за теплый сезон. В руч. Дегтярева баланс нитратов положительный. В целом, дубово-широколиственные сообщества бассейна удерживают около 4 т общего азота за сезон. Высокая способность сохранять азот, вероятно, обусловлена эффективным его поглощением вторичными лесами, так как возраст древостоев может косвенно указывать на удержание азота в экосистеме через соотношение C/N в почве (Fuss et al., 2019). Авторы также сообщают, что в почвах под старовозрастными древостоями исследуемых ими экосистем соотношение C/N было самым низким, что, по их мнению, указывает на близость к эффективному насыщению азотом. В работе (Zhigacheva et al., 2022) сообщается о вымывании минерального азота из экосистем верховьев р. Комаровка. Авторы связывают этот процесс с увеличением количества осадков в теплое время года и со значительным вкладом атмосферного осаждения азота.

Содержание общего растворенного **фосфора** в исследуемых ручьях довольно низкое и составляет 11–24 мкгР/л в водах руч. Дегтярева и 7–15 мкгР/л в водах руч. Березовый (табл. 2). Небольшие различия, скорее всего, связаны с литологическими характеристиками водосборов (табл. 1). Подобные содержания фосфора наблюдались в таежных реках северного Сихотэ-Алиня, в реках Приморского края с минимальной антропогенной нагрузкой (Форина и др., 2013; Шулькин и др., 2021). Основная доля общего растворённого фосфора приходится на минеральные формы, поскольку первичным источником фосфора природных вод являются горные породы. Малые концентрации фосфора в стоке лесных ручьев могут быть следствием низкой растворимости основных фосфатных минералов, а также его высоким биотическим потреблением (Савенко, Савенко, 2007). Изучение сезонной динамики показало незначительное увеличение концентрации растворенного фосфора в летний период: в июле – в водах руч. Дегтярева, в августе – руч. Березовый (табл. 2). Это могло быть связано с выносом фосфора из верхних почвенных горизонтов во время дождей. В это же время наблюдается наибольший латеральный

сток данного элемента. За теплый сезон с ручьевыми водами экспортируется около 1,5–3 кг/км² общего фосфора (табл. 3). При этом экспорт фосфора с речными водами минимален по сравнению с другими ландшафтами и природными зонами (Савенко, Савенко, 2007; Сорокикова и др., 2018). Поступление фосфора из атмосферы превышает вынос с речным стоком. Сезонный баланс фосфора положительный в обоих ручьях.

Количество **кремния** выносимого реками, определяется множеством биогеохимических и гидрологических факторов. Реки являются основным источником поступления Si в мировой океан. Элемент в большом количестве содержится в подстилающих породах, поэтому физико-химическое выветривание в первую очередь влияет на вынос Si из бассейнов в водные экосистемы. Известно, что кремний выполняет особенно важную роль в жизнедеятельности диатомовых водорослей. Наземная растительность также регулирует доступность и поток кремнезёма, выступая одновременно его источником и поглотителем (Pokrovsky et al., 2013; Линник, Дикая, 2014). Концентрация кремния в течение сезона практически не менялась и составила 4–5 мг/л и 6–8 мг/л в водах руч. Березовый и руч. Дегтярева (табл. 2). Общая динамика в ручьевых водах сходна: постепенное и незначительное увеличение концентрации от весны к осени. Вероятно, в теплый летне-осенний период процессы выветривания идут более интенсивно. Вынос кремния в большей степени определяется водностью, поэтому максимальный модуль стока данного элемента установлен летом (табл. 3). С дождевыми водами поступают очень низкие концентрации кремния (от следовых значений до 0,1 мг/л), что определяет его постоянный вынос за пределы речных бассейнов в течение теплого сезона.

Заключение

Наша работа была направлена на совместный анализ сезонной динамики растворенных форм углерода, азота, фосфора и кремния на водосборах с различной ландшафтной структурой. Бассейн руч. Березовый относится к системе верховьев р. Уссури, расположен на площади со средними высотами 813 м над ур. м., со сравнительно суровыми гидротермическими условиями. Почвы ландшафтов руч. Березовый развиваются на породах среднего и кислого состава, основная лесная формация – коренные хвойно-широколиственные леса. Бассейн руч. Дегтярева относится к водосбору р. Раздольная, характеризуется средней высотой 125 м над ур. м. По сравнению с водосбором руч. Березовый он отличается более мягкими гидротермическими условиями функционирования, его ландшафты сформированы на более древних и выветрелых породах среднего и основного состава. Лесной покров представлен широколиственными породами с доминированием дуба монгольского. Районы расположения модельных бассейнов различались по количеству выпавших осадков, что определило различный характер увлажнения водосборной площади, динамику речного стока, содержание и вынос биогенных элементов (БЭ).

Результаты исследований показывают, что в потоках биогенных элементов с лесных водосборов четко прослеживается влияние ландшафтных характеристик. Сезонное увеличение концентраций растворенных форм БЭ в ручьевых водах чаще всего приходится на летний период, что связано с активацией биогеохимических процессов в почвенно-растительном блоке на водосборе и в водном потоке, а также выпадением большого количества осадков, усиливающих внутрпочвенную миграцию БЭ.

Ручьи сходны по концентрации и сезонной динамике выноса растворимых форм углерода, но различаются по содержанию и латеральному стоку общего

азота. В стоке углерода обоих ручьев преобладает органическая форма. Основные отличия по растворенному азоту связаны с доминированием органической формы в водах ручья Дегтярева, дренирующего склоны с дубово-широколиственными лесами, что может быть связано с интенсивным развитием и метаболизмом фитопланктона в более благоприятных (теплых) экологических условиях, а в ручье Березовом – с наибольшим содержанием в воде нитратного азота. Прохождение высоких паводков в июле и августе усилило экспорт растворенных форм органического углерода и нитратного азота с водами ручья Березового. Здесь установлен вынос PO_4 и NO_3^- за пределы водосборной площади. В бассейне руч. Дегтярева определено удержание растительными сообществами около 2 т растворенных форм минерального азота и более 7 т PO_4 .

Установлено, что практически весь растворенный фосфор и органический азот закрепляются в почвенном профиле лесных сообществ. Количество кремния в большей степени определяется возрастом подстилающих пород и выше в ландшафтах бассейна руч. Дегтярева. Его концентрация мало меняется в течение сезона, но видна тенденция увеличения выноса кремния в периоды высокой водности. Кремний в незначительных количествах поступает с дождевыми водами и его баланс в пределах водосборной площади отрицательный в течение всего теплого сезона.

Таким образом, в водосборах, отличающихся набором ландшафтообразующих факторов, выявлены различные тренды латерального стока углерода и биогенных элементов в течение теплого периода одного года. Для полного понимания их круговорота на водосборах с коренными и вторичными лесами необходим постоянный и расширенный мониторинг, который будет полезен для целей получения достоверных эмпирических данных и понимания функционирования различных ландшафтов, выявления особенностей биогеохимических циклов внутри водосборных бассейнов и их вклада через ручьи в глобальные речные системы.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (темы № 124012400285-7 и 125021302113-3) и в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Литература

- 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.
- Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. 2005. Геохимия, функционирование и динамика горных геосистем Сихотэ-Алиня (юг Дальнего Востока России). Владивосток: Дальнаука. 253 с.
- Богатов В.В., Микелл Д., Розенберг В.А., Воронов Б.А., Краснопеев С.М., Мерилл Т. 2000. Стратегия сохранения биоразнообразия Сихотэ-Алиня. Владивосток: ДВО РАН; Всемирный фонд дикой природы. 136 с.
- Богатов В.В., Федоровский А.С., Никулина Т.В. 2013. Роль гидрологических факторов в формировании видового разнообразия сообществ водорослей (на примере реки Комаровки, Приморский край, Россия) // *Экология*. № 6. С. 428–435.
- 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*. Т. 33, № 2. С. 90–101.

- Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Краснопеев С.М., Гарцман Б.И. 2015. Анализ пространственной дифференциации почвенного покрова юга Приморья на примере бассейна р. Комаровка // *Почвоведение*. № 3. С. 268–276.
- Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Орляковский А.В., Тарбеева А.М., Шамов В.В., Шекман Е.А. 2020. Формы линейной организации склонового стока в среднегорье (на примере Сихотэ-Алиня) // *Водные ресурсы*. Т. 47, № 2. С. 123–132. DOI: 10.31857/S0321059620020042
- Горчаков А.М. 1983. Исследование элементов водного баланса и его структуры в Приморье. Ленинград: Гидрометеиздат. 182 с.
- Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупаков С.Ю. 2019. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. № 6. С. 126–140. DOI: 10.31857/S2587-556620196126-140.
- Елпатьевский П.В. 1993. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. М.: Наука. 253 с.
- Жарикова Е.А., Голодная О.М. 2024. Оценка запасов углерода в почвах лесов юга Приморья // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион*. Серия: Естественные науки. № 4–1. С. 97–105.
- Жильцов А.С. 2008. Гидрологическая роль горных хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука. 332 с.
- Кожевникова Н.К., Дюкарев В.Н. 2011. Эколого-защитные свойства лесного покрова верхнего пояса гор // *Проблемы региональной экологии*. № 4. С. 31–38.
- Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Шамов В.В. 2022. Формирование кислотности дождевых вод в залесенном бассейне Сихотэ-Алинской горной области // *Геохимия*. Т. 67, № 12. С. 1297–1311.
- Кожевникова Н.К., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Лупаков С.Ю., Шамов В.В. 2017. Водная миграция макроэлементов в хвойно-широколиственных лесах Сихотэ-Алиня // *Сибирский лесной журнал*. № 3. С. 60–73.
- Кудяров В.Н. 2023. Почвенное дыхание и секвестрация углерода (обзор) // *Почвоведение*. № 9. С. 1011–1022.
- Куприн А.В., Тюнин А.П. 2024. База данных «Эмиссия углекислого газа из почв репрезентативных биогеоценозов юга Дальнего Востока России». Номер свидетельства: RU2024623113. Дата публикации: 15.07.2024. Объем: 32,4 МБ.).
- Линник П.Н., Дикая Т.П. 2014. Содержание, формы нахождения и особенности распределения и миграции кремния в поверхностных водах Украины // *Водные ресурсы*. Т. 41, № 6. С. 606–620. doi: 10.7868/S0321059614060133
- Лозовик П.А., Галахина Н.Е., Кравченко И.Ю. 2017. Современное состояние водных объектов Карелии в результате воздействия природных, климатических и антропогенных факторов // *Водное хозяйство России*. № 3. С. 24–39.
- 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 Сессии географов Сибири и Дальнего Востока*. Владивосток: ТИГ ДВО РАН. С. 150–152.
- Луценко Т.Н., Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. 2013. Пространственно-временная динамика химического состава речных вод российской части бассейна реки Уссури // *Водное хозяйство России*. № 3. С. 65–80.
- Москалюк Т.А. 2022. Исследования на экологическом профиле «Горнотаежный» (Южное Приморье) // *Вестник ДВО РАН*. № 4. С. 126–140.
- Петропавловский Б.С. 2016. О разнообразии типов леса в Приморском крае // *Сборник научных трудов ГНБС*. Т. 143. С. 148–155.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Приморье. 1972. Л.: Гидрометеиздат. Т. 18, вып. 3. 627 с.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. 1977. Л.: Гидрометеиздат. 542 с.
- Савенко В.С., Савенко А.В. 2007. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. М.: ГЕОС. 248 с.
- Сапожников А.П., Селиванова Г.А., Ильина Т.М., Дюкарев В.Н., Бутовец Г.Н., Гладкова Г.А., Гавренков Г.И., Жильцов А.С. 1993. Почвообразование и особенности круговорота веществ в горных лесах Южного Сихотэ-Алиня. Хабаровск: ДальНИИЛХ. 269 с.
- Свистов П.Ф. 2015. Атмосферные осадки: химический состав и кислотность // *Природа*. № 6. С. 28–36.
- Смагин А.В. 2000. Газовая функция почв // *Почвоведение*. № 10. С. 1211–1223.
- Сорокинова Л.М., Томберг И.В., Синюкович В.Н., Моложникова Е.В., Елецкая Е.В. 2018. Фосфор в воде р. Селенги и его поступление в оз. Байкал в условиях низкой водности // *География и природные ресурсы*. № 4. С. 88–94.

- Форина Ю.А., Шестеркин В.П. Шестеркина Н.М. 2013. Фосфор в воде таящих рек Северного Сихотэ-Алиня // *Тихоокеанская геология*. Т. 32, № 1. С. 116–119.
- Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Перепелятников Л.В. 2009. Пространственно-временная изменчивость химического состава речных вод юга Дальнего Востока РФ // *Водные ресурсы*. Т. 36, № 4. С. 428–439.
- Шулькин В.М., Качур А.Н., Кубай Б.В. 2021. Межгодовая изменчивость основных показателей качества вод рек Приморского края в 2001–2017 гг. // *Метеорология и гидрология*. № 1. С. 73–81.
- Шулькин В.М., Никулина Т.В. 2015. Комплексная оценка качества речных вод Приморского края РФ по химическим характеристикам и составу водорослей перифитона // *Биология внутренних вод*. № 1. С. 19–29.
- Drake T.W., Raymond P.A., Spencer R.G. M. 2018. Terrestrial carbon inputs to inland waters: A current synthesis of estimates and uncertainty // *Limnol. Oceanogr. Lett.* Vol. 3, is. 3. P. 132–142.
- Fuss C.B., Lovett G.M., Goodale C.L., Ollinger S.V., Lang A.K., Ouimet A.P. 2019. Retention of nitrate-N in mineral soil organic matter in different forest age classes // *Ecosystems*. Vol. 22. 1280–1294. doi.org/10.1007/s10021-018-0328-z
- Laudon H., Hasselquist E.M., Peichl M., Lindgren K., Sponseller R., Lidman F., Kuglerová L., Hasselquist N.J., Bishop K., Nilsson M.B., Ågren A.M. 2021. Northern landscapes in transition: Evidence, approach and ways forward using the Krycklan Catchment Study // *Hydrological Processes*. Vol. 35, N 4. e 14170. doi:10.1002/hyp.14170.
- Ledesma J.L., Futter M.N., Laudon H., Evans C.D., Kohler S.J. 2016. Boreal forest riparian zones regulate stream sulfate and dissolved organic carbon // *Science of the Total Environment*. N 560. P. 110–122. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.230
- Lee M.-H., Payeur-Poirier J.-L., Park J.-H., and Matzner E. 2016. Variability in runoff fluxes of dissolved and particulate carbon and nitrogen from two watersheds of different tree species during intense storm events // *Biogeosciences*. Vol. 13, is. 18. P. 5421–5432. DOI: 10.5194/bg-13-5421-2016
- Liu F., Wang D. 2022. Dissolved organic carbon concentration and biodegradability across the global rivers: A meta-analysis // *Science of the Total Environment*. N 818. P. 151828.
- Monteith D.T., Stoddard J.L., Evans C.D., de Wit H.A., Forsius M., Høgåsen T., Wilander A., Skjelkvåle B.L., Jeffries D.S., Vuorenmaa J., Keller B., Kopáček J., Vesely J. 2007. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry // *Nature*. Vol. 450, is. 7169. P. 537–40. DOI: 10.1038/nature 06316.
- Pokrovsky O.S., Reynolds B.C., Prokushkin A.S., Schott J., Viers J. 2013. Silicon isotope variations in Central Siberian rivers during basalt weathering in permafrost-dominated larch forests // *Chemical Geology*. N 355. P. 103–116. doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.07.01
- Raymond P.A., Saiers J.E. 2010. Event controlled DOC export from forested watersheds // *Biogeochemistry*. N 100. P. 197–209.
- Zhigacheva E.S., Sase H., Nakata M., Ohizumi T., Gromov S.A., Takahashi M. 2022. Stream water acidification in the Far East of Russia under changing atmospheric deposition and precipitation patterns // *Limnology*. Vol. 23. P. 415–428. doi.org/10.1007/s10201-022-00696-0