

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И
ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

Научная статья / Scientific paper

УДК: 556.5.028

DOI: 10.34753/HS.2025.7.1.10

**Вынос растворенных веществ с речными водами горно-лесных бассейнов
в годы различной водности**

Н.К. Кожевникова¹, А.Г. Болдескул², Т.Н. Луценко², С.Г. Юрченко², Е. В. Еловский³

¹ Федеральный научный центр биоразнообразия ДВО РАН, г. Владивосток, Россия;

² Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

³ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

e-mail: nkozhevnikova@biosoil.ru

Аннотация. В настоящей статье представлены результаты оценки поступления химических компонентов с дождями и их выноса с речными водами в контрастных условиях увлажненности водосборов. Анализ выполнен на основе натурных данных, полученных в летне-осенний период 2014–2022 гг. на водосборах ручьев, формирующих сток реки четвертого порядка. Основываясь на рассмотрении взаимосвязи концентраций химических компонентов и расхода воды, в работе обсуждаются актуальные вопросы возможных причин разной динамики и характера поведения растворенных веществ во время экспорта из наземных экосистем в ручьи. Атмосферные осадки исследуемой территории представляют собой маломинерализованные слабокислые растворы, основным компонентом которых является растворенный органический углерод. Во влажные годы поступление суммы минеральных компонентов было выше, чем в относительно сухие на 18 %, органических – на 44 %. Речные водосборы отличаются набором ландшафтообразующих факторов и проявляют разную чувствительность к условиям увлажнения. Отличия в поведении растворенных веществ в ручьях обусловлены сезонными изменениями гидрометеорологических условий и смешением различных источников поступления воды. В водах всех изучаемых ручьев растворенные формы углерода и сульфаты определены как наиболее динамичные и чувствительные к гидрологическим изменениям, а хлориды, калий, кремний и фосфор демонстрируют статичность и отсутствие достоверной связи с водностью. Различный характер поведения растворенных веществ в ручьевых водах соседних бассейнов установлен для нитратного азота, алюминия, железа и марганца, основным источником которых является почвенно-растительный блок, а также для кальция, магния и натрия, поступающих, преимущественно, с почвенно-грунтовыми водами. Показано, что наибольшие концентрации растворенных минеральных компонентов наблюдаются в сезоны с пониженной водностью, органических – с повышенной. При этом в многоводные годы экспорт минеральных растворенных веществ увеличивается на 14–67 %, растворенного органического углерода на 24–100 % по сравнению со среднемноголетним значением. Основную долю выносимых минеральных компонентов составляют растворимые формы кальция, кремния и неорганического углерода. Вне зависимости от увлажнения наибольший вклад минеральных компонентов в сток главной реки вносят воды притока третьего порядка, водосбор которого подстилается горными породами основного и среднего состава. Из бассейна с высокой долей площади коренных хвойных лесов экспортируется наибольшее количество растворенного органического углерода (0,1–2,0 т/км²) и нитратов (0,1–0,2 тN/км²) за сезон. Установлено, что в ручьях второго порядка, почвы которых формируются на устойчивых к внешним воздействиям коренных породах преимущественно кислого состава, растворенные формы органического углерода преобладают над неорганическими. В водах ручья третьего порядка незначительное доминирование растворенного органического углерода выявлено только в годы повышенной водности.

Ключевые слова: горно-лесной бассейн; ручей; экспорт растворенных веществ; увлажненность водосбора; многоводный год; маловодный год; растворенный углерод; нитратный азот; хвойно-широколиственные леса; муссонный климат.

Для цитирования: Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н., Юрченко С.Г., Еловский Е. В. Вынос растворенных веществ с речными водами горно-лесных бассейнов в годы различной водности // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 1. С. 10–34. DOI: 10.34753/HS.2025.7.1.10.

Export of dissolved substances with river waters of mountain forest basins in years of varying water content

Nadezhda K. Kozhevnikova¹, Anna G. Boldeskul², Tatyana N. Lutsenko², Svetlana G. Yurchenko², Evgeniy V. Elovskiy³

¹ *Federal Scientific Center for Biodiversity FEB RAS, Vladivostok, Russia;*

² *Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia*

³ *Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia*

e-mail: trofimetc_1_n@mail.ru

Abstract. This article presents the results of assessing the input of chemical components with rains and their output with river waters in contrasting watershed moisturizing. The analysis was performed on the field data of the summer – autumn periods of 2014–2022 in the stream basins forming the river flow of the fourth order. Based on the relationship between concentrations and water discharge, the paper discusses the possible causes of different dynamics and behavior of dissolved substances during export from ecosystems to the streams. Atmospheric precipitation is the low-mineralized slightly acidic solutions the main component of which is dissolved organic carbon. In wet years, the input of mineral components was 18 % higher than in relatively dry years, while organic components were 44 % higher. River catchments differ in the landscape factors and exhibit different sensitivity to humidification. Differences in the dissolved substances behavior are determined by seasonal changes and by the mixing of various water sources. In the streams the dissolved organic carbon and sulfates are identified as the most dynamic to hydrological changes, while chlorides, potassium, silicon, and phosphorus demonstrate more static behavior. The difference between the waters of neighboring basins is established for nitrate, aluminum, iron, and manganese. The main source of them is the soils and plants, as well as for calcium, magnesium, and sodium, which mainly come from soils and groundwater. It is shown that the highest element concentrations are observed in the low water period of the year, and organic components – in the high-water period. At the same time, in high-water years, the export of mineral components increases up to 14–67 %, and organic components up to 24–100 % compared to the annual average. Dissolved calcium, silicon, and inorganic carbon make up the bulk of the carried mineral components. Regardless of the moisture, the largest contribution of dissolved mineral components to the river flow is made by the waters of a third-order tributary, in the catchment of which there are highly weathered Jurassic rocks of the basic composition. In the waters of this stream a slight dominance of dissolved organic carbon was revealed only in the high-water years. The basin with a high proportion of indigenous coniferous forests the soils of which are formed on acidic rocks resistant to weathering, exports the largest amount of dissolved organic carbon (0.1–2.0 t/km²) and N–NO₃ (0.1–0.2 tN/km²). In the waters of a third-order stream, a slight dominance of dissolved organic carbon was found only in years of increased water levels.

Key words: mountain–forest basin; creek; export of dissolved substances; watershed moisture; high-water year; low-water year; dissolved carbon; nitrate nitrogen; coniferous–broadleaf forests; monsoon climate.

For citation: Kozhevnikova N.K., Boldeskul A.G., Lutsenko T.N., Yurchenko S.G., Elovskiy E.V. Export of dissolved substances with river waters of mountain forest basins in years of varying water content. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 1, pp. 10–34. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.1.10. (In Russian; abstract in English).

Введение

Сток растворенных веществ (гидрохимический сток) является качественной характеристикой климатических и биогеохимических процессов в речных бассейнах разного уровня. Его величина и качественный состав изменяются в широком диапазоне в зависимости от литологических особенностей, климатических условий, ландшафтных характеристик и антропогенного воздействия на водосборы [1–4]. В горных районах высотная поясность определяет сложное ландшафтное строение бассейнов, разнообразие почвенно-растительных и гидротермических условий, что влияет на формирование гидрохимического стока. Речные воды большинства горных территорий маломинерализованные, а среднегодовая концентрация растворенных органических веществ в 1,5 раза ниже, чем в водах равнинных рек [5]. Контрастность ландшафтов обуславливает большое разнообразие источников поступления растворённых веществ в ручьи и реки [6–8]. Натурные исследования показали, что воды рядом протекающих горных ручьев могут различаться по минерализации, кислотности, анионному составу [9]. Результаты гидрологического и геохимического моделирования свидетельствуют о значительных различиях в характере формирования стока соседних водосборов [10–11]. Зависимости содержания химических компонентов от расхода воды демонстрируют значительную вариабельность форм связи отдельных растворенных веществ в разных речных бассейнах [12]. Изменчивость связи между концентрацией растворенных веществ и расходом воды наиболее заметна при критических значениях водности. Во время выдающихся паводковых событий наблюдается смена направленности динамики растворенных веществ, что влияет на характер сезонной связи их концентраций с водностью [13].

Объекты исследований расположены в пределах западного макросклона Южного Сихотэ-Алиня. Основная масса растворенных веществ выносится в р. Уссури. Верхняя часть бассейна реки является крупным природным комплексом Приморского края, значимым

ландшафтообразующим компонентом которого является лесной покров [14]. Речная сеть равномерно распределена по площади бассейна, средняя густота ее составляет $0,79 \text{ км} \cdot \text{км}^{-2}$, водность – $9\text{--}12 \text{ л} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$. Основу гидрографической сети составляют малые и очень малые реки, для которых существенны биотические механизмы формирования химического состава вод [15–16]. Исследуемая территория входит в область умеренного климата средних широт с интенсивной циклонической активностью и характеризуется заметной внутригодовой и межгодовой динамикой поступления атмосферных осадков. Данный климатический фактор оказывает существенное влияние на гидрологический режим водосборных бассейнов, что приводит к модификации структуры водного и гидрохимического стока и изменению относительной значимости различных источников формирования стока. В рамках настоящей работы предпринята попытка количественной оценки динамики выноса наиболее значимых химических компонентов, задействованных в формировании стока, с целью выявления закономерностей и механизмов их миграции и трансформации в условиях неоднородного увлажнения. Для региона характерны выходы тропических и внетропических циклонов, которые определяют не только характер формирования речного стока, но и являются источником поступления на водосборную площадь загрязняющих веществ [17–19]. Еще одним важным фактором, влияющим на гидрохимический сток в исследуемых бассейнах, является степень нарушенности лесного покрова, обусловленная, преимущественно, лесозаготовками и пожарами. Уровень современного освоения коренных лесов в истоках рек бассейна Уссури проявляется в существенном преобразовании лесного и почвенного покрова. Естественное восстановление нарушенных лесных экосистем в зонах формирования вод идет крайне медленно [14], что ведет к перестройке сложившихся биогеохимических циклов основных элементов питания и отражается на количественных и качественных характеристиках речных и почвенных вод [15, 20–21]. Таким образом, современный анализ состава входных и

выходных потоков растворенных веществ в бассейнах горных рек важен для установления причинно-следственных связей миграции химических элементов между лесными и водными экосистемами. На Дальнем Востоке подобные исследования единичны, и количественные оценки пространственной и временной изменчивости гидрохимического стока в бассейнах региона остаются мало изученными. Цель настоящих исследований заключается в выявлении закономерностей внутрибассейнового распределения стока растворенных веществ в горно-лесной местности и его динамики в различные по водности годы. Для достижения поставленной цели выполнен анализ данных натурных наблюдений за химическим составом дождевых осадков и вод ручьев 2–3 порядка (здесь и далее применяется порядковая классификация Хортон–Стралера [22]).

Материалы и методы исследования

Гидрохимические исследования проводились в бассейне р. Правая Соколовка общей площадью 45 км², расположенного в центральной части Приморского края в зоне муссонных хвойно-широколиственных лесов (рисунок 1). На всей площади бассейна расположен Верхнеуссурийский лесной стационар Федерального научного центра Биоразнообразия ДВО РАН (на рисунке 1 обозначен как ВУС), на котором проводятся многолетние гидрометеорологические наблюдения, а с 2010 г. осуществляется мониторинг химического состава ландшафтных вод [23–24, 16]. Река относится к системе верховьев Уссури и является ее правым притоком четвертого порядка. Исследуемая территория закрыта горными хребтами, удалена от морского побережья, крупных транспортных магистралей и населенных пунктов. Диапазон абсолютных высот составляет 444–1108 м над уровнем моря. В функционировании водосборов активную роль играет лесной покров хорошо сохранившихся хвойно-широколиственных и темнохвойных экосистем, типичных для среднегорного пояса Южного Сихотэ-Алиня. Лесистость бассейна составляет 98 %. В почвенно-растительном покрове четко выражена

вертикальная поясность. На высотах до 800 м широко распространены (около 63 % общей площади) буроземы типичные и оподзоленные, развитые под кедрово-широколиственными лесами на делювиальных и элювиально-делювиальных отложениях. В поясе темнохвойных лесов (800–1100 м) представлены ржавоземы грубогумусовые (17,8 %) и литоземы иллювиально-гумусированные (6,1 %) на щебнистых элювиальных и элювиально-делювиальных отложениях. Пойменные почвы, сформированные на аллювии, занимают около 7 % общей площади [25]. Отличие между почвами состоит в содержании органического вещества и его качественном составе, что обусловлено интенсивностью биологического круговорота в биогеоценозах различных высотных зон [26]. Общей чертой всех почв бассейна является их каменистость и большое содержание крупного и среднего песка, что определяет высокую инфильтрационную способность почв [23]. Как правило, атмосферные осадки быстро проникают в толщу склоновых отложений и далее стекают в виде подповерхностных водных потоков. Наиболее значительные зоны концентрации подповерхностного склонового стока образуют закрытую дренажную сеть, схожую по роли и масштабам с первичной гидрографической сетью [27]. Поверхностный сток образуется только в периоды продолжительных интенсивных осадков, когда его доля во время паводкового события может быть достаточно высокой [6, 23].

Природные условия формирования стока растворенных веществ в исследуемых ручьях

Формирование гидрохимического стока в створе р. Правая Соколовка обусловлено неоднородностью ландшафтного строения водосборов ее притоков, различающихся по геологическому строению, положению в рельефе, лесному и почвенному покрову [23, 25–26]. Бассейн главной реки сложен разновозрастными породами: от позднемеловых эффузивов кислого состава до древних юрских и триасовых осадочных пород среднего и основного состава. Сложная ландшафтная структура ручьев второго порядка (Еловый и

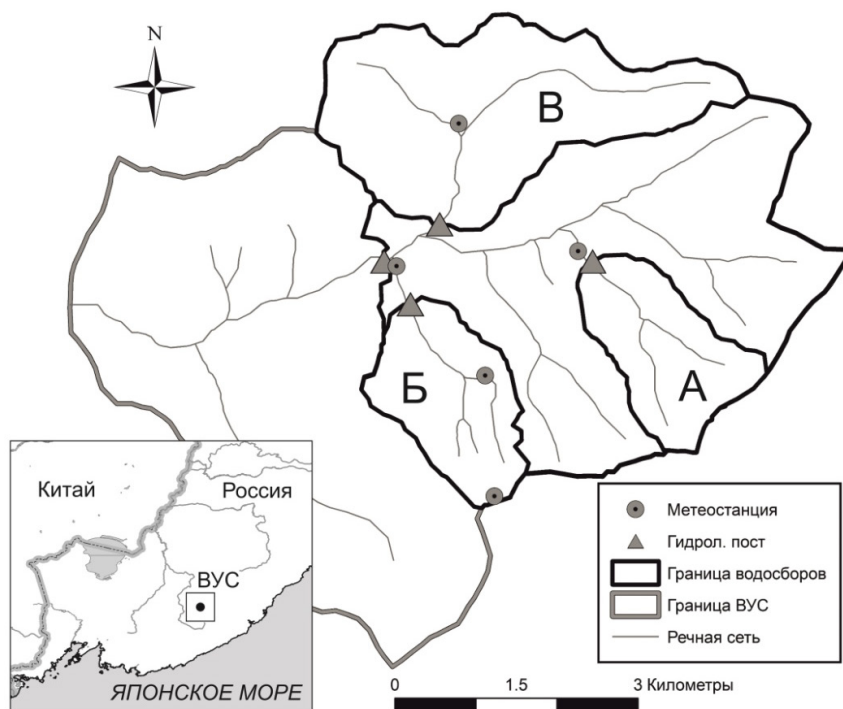


Рисунок 1. Схема расположения модельных водосборов в бассейне р. Правая Соколовка:

А – руч. Березовый; Б – руч. Еловый; В – руч. Медвежий ключ

Figure 1. A layout of research catchments in the Pravaya Sokolovka River basin: A – Berezovy Creek; Б – Yelovy Creek; В – Medvezhiy Creek

Березовый) определяется особенностями геологического и геоморфологического строения их бассейнов. Долины ручьев узкие и глубокие, с фрагментами надпойменной террасы и крутыми выпуклыми склонами, изредка прорезанными глубокими эрозионными ложбинами [10, 23]. Горные породы водосборов представлены преимущественно меловыми и триасовыми вулканитами и субвулканитами кислого и среднего состава. Для водосборов этих ручьев, а также верховьев р. Правая Соколовка до высоты 750–720 м над уровнем моря, характерны местообитания с доминированием кедра в первом древесном ярусе. На более высоких элементах рельефа и теневых склонах усиливается эдификаторная роль ели аянской и пихты белокорой. В нижнем течении на северных склонах руч. Березовый и Еловый в 1950-х гг. была проведена промышленная вырубка с изъятием кедра и других хвойных пород. К тому же, в верховьях руч. Еловый на площади 42 га в 1965–1966 гг. производилась экспериментальная вырубка леса [23]. К настоящему времени на пройденных рубками склонах сформировались разновозрастные

лиственные и хвойно-лиственные насаждения. Размещение и площадь коренных и вторичных лесов на склонах водосборов руч. Березовый и Еловый (таблица 1) определяют разнообразный химический состав почвенных вод и динамику их поступления в устье ручьев [9, 16]. В ходе маршрутных обследований бассейна руч. Еловый было установлено, что водосборы верхнего и нижнего течения ручья различаются по диапазону высот рельефа, дренажным свойствам почвенного покрова. Анализ гидрометрических данных вложенных водосборов показывает несогласованную динамику стокоформирования в верхней и нижней частях бассейна. Дренажная сеть водосбора неодинаково реагирует на выпадающие осадки и при слабой увлажненности более 65 % стока в замыкающем створе руч. Еловый формируется за счет верхней части бассейна [24].

Водосбор руч. Медвежий ключ можно назвать относительно однородным в ландшафтном отношении. В бассейне преобладают юрские метаморфические породы основного состава, высоты более 800 м над уровнем моря занимают незначительную

площадь, рельеф сглажен (таблица 1). Водосбор быстрее, чем другие реагирует на выпадающие осадки. В среднемноголетней сезонной динамике доля базисной компоненты в общем речном стоке выше, а доля вод, поступающих из верхних почвенных горизонтов, ниже, чем в соседних бассейнах [6, 11]. Склоны на 70 % покрыты смешанными лесами с развитым напочвенным травяным покровом и подлеском. В большей части лес пройден промышленными рубками, встречаются гари различной давности. Преобладают лиственные породы. Участки с высокой долей хвойных в составе древостоев сохранились на крутых теневых склонах бассейна. В долине нижнего течения ручья хорошо выражена пойма с ясенево-ильмовыми лесами, под которыми формируются богатые питательными веществами почвы [26, 28]. При значительном увлажнении почвы пойм и надпойменных террас являются местом аккумуляции и транзита всех сконцентрированных склоновых подповерхностных вод водосбора, а в относительно сухие периоды на этих почвах, благодаря близкому расположению грунтовых вод, осуществляется поддержание достаточной водности рек [23].

Для оценки выноса растворенных веществ в замыкающий створ верхнего течения р. Правая

Соколовка обследованы два ее притока второго порядка и один приток третьего порядка, общий вклад которых в сток на данном участке Правой Соколовки составляет более 60 % (рисунок 1, таблица 1). Гидрохимический пост на р. Правая Соколовка был оборудован в 2020 г. в 20 м ниже места впадения руч. Еловый (рисунок 1). Площадь водосбора в замыкающем створе составила 26 км². Створы р. Правая Соколовка и ее притоков были оборудованы автоматическими регистраторами уровня воды. Расходы воды измерялись вручную с применением электромагнитного измерителя скорости потока. Суточные расходы воды получены с помощью кривых связи расхода и уровня. Водосборы левобережных притоков Березовый и Еловый близки по площади и модулю стока (таблица 1). Бассейн правобережного руч. Медвежий ключ (далее по тексту – Медвежий) более чем в 2 раза больше. Количество воды, стекающей с единицы его площади, в многоводные годы сопоставимо со стоком других ручьев, а в относительно сухие сезоны может быть на 20–40 % ниже. Сток в ручьях устойчивый, кратковременное пересыхание было зарегистрировано при затяжной летней межени 2012 г. в устьевой части ручьев Еловый и Медвежий.

Таблица 1. Ландшафтные и морфометрические характеристики исследуемых рек

Table 1. Landscape and morphometric characteristics of the studied rivers

Река	Порядок реки	Площадь, км ²	Высота, м. над ур. м.		Падение реки, м	Сток, л/с/км ²	Доля хвойных пород, %
			макс	средняя			
Березовый	II	3,11	1075	813	470	13,1	70
Еловый	II	3,51	962	721	433	11,3	60
Медвежий	III	7,67	869	706	322	9,89	40
Правая Соколовка	III	26,2	1104	744	579	–	60

Прочерк означает отсутствие данных

В рамках данного исследования были количественно определены значения выноса основных ионов, а также растворенных форм органического углерода, общего кремния и фосфора. Дополнительно были проведены измерения концентраций ряда литофильных металлов, включая стронций, железо и алюминий. Содержание данных элементов в проанализированных водных объектах варьируется в пределах первых сотен микрограммов на литр и демонстрирует значительные различия между

исследуемыми ручьями. Дополнительно были изучены такие микроэлементы, как марганец, медь, свинец и никель, которые играют важную роль в оценке функционирования ландшафтов [29].

Пробы речных вод на химический анализ отбирались систематически в течение сезона одновременно с измерением расхода воды и охватывали различные периоды увлажнения. Гидрохимическое опробование вод других ручьев в пределах площади названных выше бассейнов проводили во время летне-осенней межени. Всего

за 2014–2022 гг. было отобрано и проанализировано 600 речных и 120 дождевых проб. В день отбора в нефилтрованных пробах определяли pH воды и содержание гидрокарбонат-ионов (HCO_3^-) потенциометрическим титрованием. Растворенный неорганический углерод (РНУ) рассчитан на основании содержания гидрокарбонатов. Для нахождения остальных компонентов воду пропускали через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм. Анализ макрокомпонентов выполнялся в Центре ландшафтной экодиагностики и ГИС-технологий ТИГ ДВО РАН. Содержание главных анионов (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) определялось на жидкостном хроматографе Shimadzu LC 10Avp, главных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) – на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA 6800. Определение содержания растворенного органического углерода (РОУ) в воде проводилось с помощью ТОС-анализатора (Shimadzu TOC-VCPN). Определение кремния, фосфора и микроэлементов выполнялось в центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700 x.

Все необходимые расчеты выполнены за периоды совместных наблюдений на ручьях в течение 2014–2022 гг. (июнь–сентябрь). Из общего массива данных были выделены и сгруппированы годы с суммой осадков за летне-осенний сезон выше или ниже среднееголетней величины. Поступление и вынос химических компонентов рассчитывались путем умножения концентрации вещества (С) на количество осадков и слой речного стока соответственно. Концентрация химических компонентов представлена как средневзвешенная за исследуемый период величина. Данные по химическому составу дождевых вод являются общей для всех водосборов выборкой. Минеральная составляющая растворенных веществ рассчитана по содержанию в воде основных ионов, кремния, фосфора и микроэлементов (стронция (Sr), алюминия (Al), железа (Fe), марганца (Mn), свинца (Pb) и меди (Cu)), органическая компонента – по содержанию растворенного органического углерода. Баланс растворенных веществ рассчитан как разница

между их поступлением с дождевыми осадками и выносом с речными водами. Приведенные в работе статистические параметры и коэффициенты значимы на уровне $p < 0,05$.

Результаты

Характер выпадения осадков и формирование стока ручьев

Вариации концентраций растворенных веществ и их вынос с ручьевыми водами связаны с особенностями увлажнения водосборной площади. Исследуемые годы (2014–2022 гг.) характеризовались чередованием влажных и засушливых летне–осенних сезонов. Относительно среднееголетнего количества осадков за июнь–сентябрь (460 мм) в данный временной период было выделено пять лет с повышенной водностью (многоводные) и четыре года с пониженной водностью (маловодные) (таблица 2). Сумма осадков варьировала от 334 до 872 мм за сезон. Количество дождевых осадков в годы с пониженной водностью было на 17–27 % ниже среднееголетнего значения, а в общей сумме осадков гидрологического года их доля за июнь–сентябрь составила 44–61 % (таблица 2). В маловодные годы преобладали умеренные (< 30 мм) осадки, наблюдались длительные бездождевые периоды. Летне-осенний сезон этих лет (таблица 2) был отмечен редкими паводками с модулем стока 30–50 л/(с·км²) в ручьях Медвежий и Еловый и 51–73 л/(с·км²) – в руч. Березовом. Минимальная сумма сезонного слоя стока отмечена в 2021 г. Средний расход воды во всех ручьях в 2021 г. был в 1,5–3 раза ниже, чем в остальные маловодные годы. В многоводные годы в июне–сентябре выпадало более половины осадков гидрологического года. Суточное количество дождя часто превышало 50 мм. Интенсивные дожди обуславливали равномерное увлажнение исследуемых водосборов и практически равный речной сток. В 2016, 2018 и 2022 гг. наблюдались паводки редкой повторяемости. Модуль стока в периоды высокой водности часто превышал в 1,5–5,0 раз критическое значение, которое для данного района составляет ~100 л/с·км² [30]. Самым многоводным был 2020 г. Летне-осенний сток в этот год во всех ручьях превысил на 25–40 % расходы других влажных лет.

Таблица 2. Диапазоны гидроклиматических величин в годы различной водности**Table 2.** Ranges of hydroclimatic values in years of varying water content

Водность года	Годы	Осадки, мм		Слой стока, мм (июнь–сентябрь)	
		гидрологический год	июнь– сентябрь	ручьи II порядка	ручьи III порядка
Многоводный	2014, 2016, 2018, 2020, 2022	759–1206	517–872	83–260	67–220
Маловодный	2015, 2017, 2019, 2021	605–762	334–382	41–144	33–92

Поступление растворенных веществ с атмосферными осадками

Дождевые воды, поступающие на площадь исследуемого бассейна, слабокислые, маломинерализованные. Средняя величина pH изменялась от 4,3 до 6,6. Минерализация (TDS) осадков находилась в интервале 3–14 мг/л (таблица 3). Наиболее заметное увеличение суммы ионов наблюдалось в теплый сезон 2019–2022 гг. Это было связано с возрастанием в составе дождевых вод доли гидрокарбонатов и кальция. Максимальные концентрации практически всех элементов выявлены в 2021 г., что отразилось на величине суммарной минерализации дождевых вод в годы пониженной водности (таблица 3). Доминирующим компонентом химического состава дождевых вод является растворенный органический углерод. Концентрация РОУ в дождевых пробах сильно варьировала. В зависимости от погодных условий его средневзвешенная за месяц величина изменялась от 0,4 до 15,0 мг/л. Максимальные концентрации РОУ (более 5 мг/л) в пробах дождя наблюдались в период активной вегетации после продолжительного (5–14 дней) сухого периода. Во влажные годы на водосборную площадь исследуемого участка р. Правая Соколовка (26 км²) за теплый период поступало 33–50 т, в остальные – от 10 до 34 т растворенного органического углерода (таблица 3). Суммарное поступление минеральных компонентов на водосборную площадь реки составило 76 и 52 т/сезон во влажные и более сухие годы соответственно. Суммарный вклад кислотообразующих анионов ($\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$) в составе влажных выпадений составлял не менее 30 % и часто был выше эквивалентного содержания основных катионов. Отдельные дождевые выпадения были отмечены высоким содержанием меди и свинца. Поступление Cu и Pb за период выпадения дождевых осадков варьировало в пределах 0,6–0,9; 0,01–1 кг/км², соответственно. Объем

выпадения алюминия в 2020–2021 гг. был в 3 раза выше, чем железа, что определило его более высокое поступление на водосборную площадь в анализируемый период.

Влияние гидрологических условий на содержание растворенных веществ в речных водах

Концентрации растворенных макроэлементов конкретного бассейна в различные по увлажненности годы мало отличаются от среднесезонной величины, но их значения в ручьевых водах могут значительно варьировать в зависимости от объема стока [6, 9, 13, 31]. С целью оценки влияния гидрологических условий и характеристик увлажненности водосборного бассейна на поведение растворенных веществ в речных водах для 14 химических компонентов были построены регрессионные зависимости между концентрацией (C) и расходом воды (Q). Взаимосвязь C – Q лучше всего описывается степенными моделями в виде $C = aQ^b$, где коэффициент a определяет уровень концентрации, показатель b – направление и силу изменения концентрации в зависимости от расхода [3, 32]. По величине показателя b и тесноте связи C – Q для вод исследуемых ручьев выделены группы растворенных веществ (РВ), содержание которых с ростом водности потока возрастает, снижается или незначительно изменяется (таблица 4). К категории "возрастает/снижается" отнесены РВ с показателем $|b| \geq 0,1$ и $R^2 > 0,3$, как во влажные, так и сухие годы. Коэффициент регрессии $|b| \approx 0$ означает, что концентрация растворённых веществ меняется незначительно ($R^2 > 0,3$) и/или не связана с расходом воды ($R^2 < 0,3$). Химические компоненты, имеющие тенденцию к увеличению/снижению ($0,25 < R^2 < 0,3$) в многоводный или маловодный год, в таблице 4 показаны в скобках.

Таблица 3. Средневзвешенные концентрации элементов и их поступление в составе дождевых вод в различные по водности годы**Table 3.** Average weighted concentrations of elements and their input in rainwater in years of varying water content

Компонент	Многоводные		Маловодные		Среднегодовое	
	мг/л	т/км ²	мг/л	т/км ²	мг/л	т/км ²
TDS	4,02	2,71	6,16	2,26	5,14	2,66
POY	1,82	1,23	2,05	0,76	2,09	1,08
PHY (HCO ₃ ⁻)	0,33	0,22	0,52	0,19	0,42	0,23
Cl ⁻	0,29	0,20	0,38	0,14	0,33	0,17
S-SO ₄ ²⁻	0,21	0,14	0,29	0,11	0,24	0,12
N-NO ₃ ⁻	0,14	0,10	0,22	0,08	0,17	0,09
Ca ²⁺	0,54	0,36	0,79	0,29	0,70	0,36
Mg ²⁺	0,03	0,02	0,05	0,02	0,04	0,02
K ⁺	0,19	0,13	0,36	0,13	0,26	0,13
Na ⁺	0,05	0,03	0,10	0,04	0,07	0,03
Si	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	0,01
P	0,02	0,02	0,03	0,01	0,03	0,01
Sr	1,83	1,49	3,08	1,14	2,20	1,14
Al	11,3	9,18	27,6	10,2	15,4	7,97
Fe	12,4	10,1	14,5	5,37	12,6	6,53
Mn	1,53	1,24	3,05	1,13	2,21	1,14
Cu	0,89	0,72	2,01	0,74	1,30	0,67
Ni	0,28	0,22	0,51	0,19	0,38	0,20
Pb	0,81	0,66	0,31	0,11	0,63	0,33

Концентрация растворённых форм кремния, общего фосфора и хлорида во всех ручьях относительно стабильна при разных условиях увлажнения и не связана с водностью. Заметное снижение при возрастании расхода воды ($R^2=0,32-0,74$) в водах всех ручьев зафиксировано для сульфатов, РНУ и стронция (кроме Елового). Наибольшие изменения концентрации ($b \geq 0,17$) с увеличением водного стока во всех ручьях отмечены для растворенного органического углерода. Положительные значения показателя b свидетельствуют об обогащении вод РОУ, а также Al, Fe и Mn при повышенной водности. Содержание Al, Fe и Mn в водах притоков разных порядков демонстрирует в контрастные по водности годы одинаковую направленность при изменении расхода, но различную динамичность и тесноту связи $C-Q$. Это предполагает наличие других источников, влияющих на их концентрацию во время прохождения паводка. Нитратный азот проявляет себя по-разному в ручьях. Повышение концентрации и тесная связь нитратов и расходов установлена в водах Елового ($R^2 > 0,50$) за весь период наблюдений, а в водах Медвежьего только в

годы пониженной водности. В руч. Березовый связь нитратного азота с расходом не установлена. Параметр $b \approx 0$ в различные по водности сезоны, линия связи лишь в маловодные годы демонстрирует слабый положительный наклон.

Пространственно-временные вариации содержания растворенных веществ

Воды в устьях ручьев изменялись от слабокислых с суммой главных ионов 18–33 мг/л до слабощелочных с минерализацией 38–174 мг/л (таблица 5). Вариации кислотности вод, формирующих гидрографическую систему исследуемых ручьев, отражаются на величине pH в их устьевых участках. Максимальная изменчивость pH речных вод (pH=4,5–7,2) выявлена по длине ручья Еловый. В водах ручьев, относящихся к бассейнам Березового и Медвежьего, pH более стабилен и изменяется в диапазоне 5,8–7,3 и 6,5–7,8, соответственно. Снижение pH в замыкающем створе ручьев отмечается во влажные годы. Ручьи второго порядка (Еловый и Березовый) имеют сульфатно-гидрокарбонатный кальциевый состав. Для вод руч. Еловый

характерно более высокое содержание сульфат-ионов и натрия, руч. Березовый – нитрат-ионов и магния (таблица 5). В ионном составе руч. Медвежий явно выражено преобладание

гидрокарбонатов, кальция и магния, что определяет химический состав вод ручья как гидрокарбонатный магниевый-кальциевый. Этот же тип вод сохраняется в главной реке.

Таблица 4. Группы растворенных веществ по характеру изменения концентраций при увеличении расхода воды

Table 4. Groups of dissolved substances by the nature of changes in concentrations with increasing water consumption

Ручей	Снижение	Возрастание	Незначительное изменение
Березовый	S-SO ₄ ²⁻ , PHU, Sr	POY, Fe, Mn, (Al)	основные катионы, P _{общ} , Si Cl, N-NO ₃ ⁻ ,
Еловый	S-SO ₄ ²⁻ , (PHU)	POY, N-NO ₃ ⁻ , Al, Fe, (Mn)	основные катионы, P _{общ} , Sr, Si, Cl,
Медвежий	S-SO ₄ ²⁻ , PHU, Sr, Ca ²⁺ , (Mg ²⁺ , Na ⁺)	POY, (Al, Fe, Mn, N-NO ₃ ⁻)	K ⁺ , P _{общ} , Si, Cl,

Таблица 5. Ионный состав и минерализация (TDS) вод р. Правая Соколовка и ее притоков

Table 5. Ionic composition and mineralization (TDS) of the waters of the Pravaya Sokolovka River and its tributaries

Ручей/Река	TDS, g/L	Ионный состав воды, %-экв.
Березовый	33,6	$\frac{HCO_3^- 51 SO_4^{2-} 29 NO_3^- 15}{Ca^{2+} 65 Na^+ 16 Mg^{2+} 14}$
Еловый	27,5	$\frac{HCO_3^- 49 SO_4^{2-} 37 NO_3^- 8}{Ca^{2+} 58 Na^+ 15 Mg^{2+} 10}$
Медвежий	81,4	$\frac{HCO_3^- 72 SO_4^{2-} 22}{Ca^{2+} 63 Mg^{2+} 26 Na^+ 9}$
р. Правая Соколовка	48,6	$\frac{HCO_3^- 65 SO_4^{2-} 23}{Ca^{2+} 65 Mg^{2+} 21 Na^+ 10}$

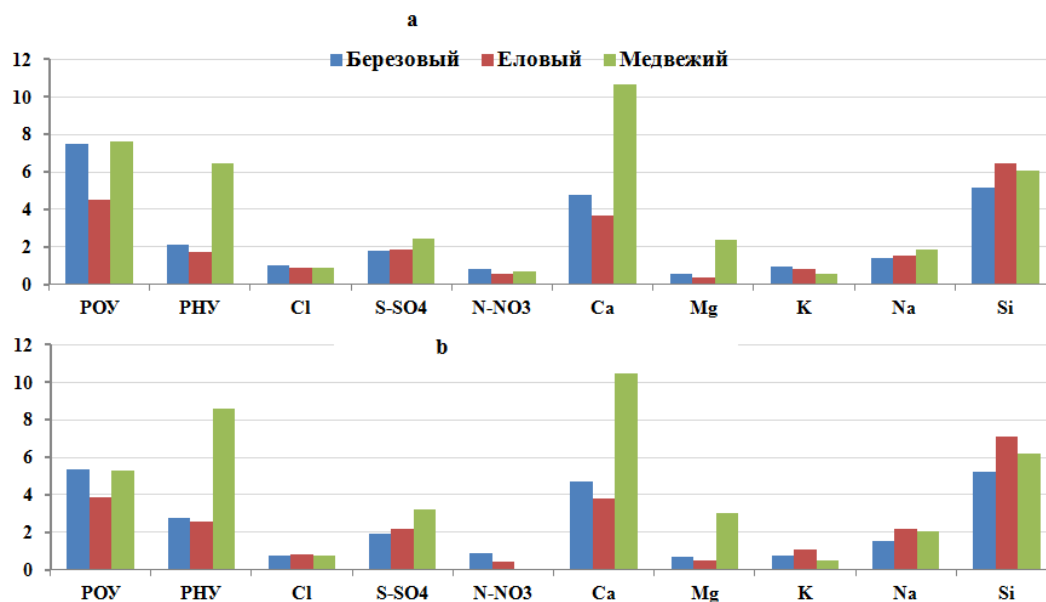


Рисунок 2. Средневзвешенные концентрации (мг/л) макрокомпонентного состава вод исследуемых ручьев в многоводные (а) и маловодные (б) годы

Figure 2. Average-weighted concentrations (mg/l) of major elements of the studied streams water in high-water (a) and low-water (b) years

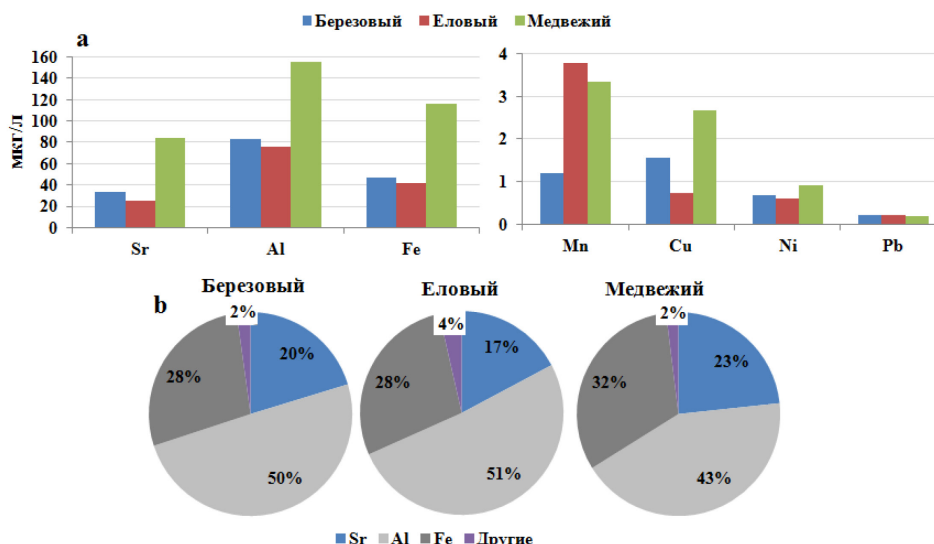


Рисунок 3. Содержание микроэлементов в водах исследуемых ручьев (а) и их соотношение относительно общей суммы в мкмоль/л (б)

Figure 3. The content of trace elements in the waters of the studied streams (а) and their share in the total in $\mu\text{mol/l}$ (б)

Временные колебания большинства минеральных компонентов, как в сезонном, так и межгодовом масштабах, были одинаковыми на всех водосборах: максимальные концентрации наблюдались при базовом стоке и в маловодные годы, минимальные – в паводковые периоды и многоводные годы (рисунок 2).

Существенных различий среднего содержания в речных водах между влажными и засушливыми сезонами года не выявлено. Можно отметить более заметное увеличение в маловодные годы концентраций неорганического углерода, калия и натрия в водах руч. Еловый и более высокое содержание хлорида во всех ручьях в многоводные годы. Содержание кремния в речных водах также мало изменялось из года в год, коэффициент вариации находился в диапазоне 4–11 %. Наиболее высокие средневзвешенные концентрации кремния (6,1–7,5 мг/л) за исследуемый период отмечены в водах руч. Еловый, минимальные (4,6–5,3 мг/л) – в водах руч. Березовый (рисунок 2). Концентрация РОУ, мобилизуемого с поверхности водосбора во время дождя, демонстрирует обратную картину – его содержание в речной воде увеличивается в годы повышенной водности. Среднее содержание и интервалы варьирования органического углерода в ручьевых водах свидетельствуют о наибольшей его изменчивости в ручьях Березовый

(1,1–11,7 мг/л) и Медвежий (2,0–10,4 мг/л). В водах Елового, вне зависимости от водности, размах варьирования РОУ ниже и составляет за весь период наблюдений 1,7–7,1 мг/л (рисунок 2). Среднее многолетнее содержание фосфора в исследуемых ручьях II порядка составляет 12 мкг/л, в р. Медвежий – 28 мкг/л.

По суммарному содержанию в воде микроэлементов ручьи располагаются в ряд: Медвежий > Березовый > Еловый (рисунок 3а). Состав микроэлементов представлен, в основном, Sr, Fe, Al, доля Mn, Cu и Ni в общей сумме составляет 0,2–2,0 %, Pb – сотые доли процента (рисунок 3б). Относительное содержание железа в исследуемых водах примерно одинаково, а по содержанию других микроэлементов ручьи заметно различаются. Воды всех ручьев в большей степени обогащены алюминием, доля которого составляет 40–56 %. Содержание растворимых в воде микроэлементов, за исключением стронция, характеризуется высокой изменчивостью ($C_v = 37–120$ %). Самой высокой вариабельностью характеризовалось содержание Al, Fe и Mn в водах руч. Медвежьего. Диапазон их концентраций за исследуемый период составил 7,5–388, 8,4–585 и 0,44–12,2 мкг/л, соответственно. Самые низкие концентрации установлены после длительных дождевых событий в многоводные годы. Нижний предел

варьирования концентраций Al, Fe и Mn в водах ручьев второго порядка был в 1,5–2 раза выше, а максимальные значения на эту же величину ниже, чем в руч. Медвежий. Доля Sr в общем микроэлементном составе менялась в различные водные фазы на фоне повышения/снижения концентрации алюминия и железа. В водах руч. Медвежий относительное содержание Sr варьирует от 3 до 53 %, в других ручьях – в диапазоне 5–30 %. Концентрация практически всех микроэлементов в исследуемых водах увеличивалась в маловодные годы.

Вынос РВ с речными водами

Суммарный за сезон экспорт макроэлементов с водами ручьев второго порядка варьировал от 2 до 10 т/км², третьего порядка – от 3 до 15 т/км² (TDS в таблице 6). В многоводные годы экспорт минеральных РВ, относительно среднеемноголетнего значения, увеличивается на 14–67 %. Максимальный ионный сток в р. Правая Соколовка поступает с водами руч. Медвежий (рисунок 4а). Вынос минеральных компонентов в маловодные годы мало различается между ручьями и составляет 3–4 т/км² за теплый период (таблица 6). Вклад ионного стока руч. Медвежий в главную реку снижается, но остается преобладающим. Основная масса (более 70 %) в общем стоке растворенных веществ приходится на углерод, кальций и кремний. С водами ручьев второго порядка интенсивнее выносятся сульфаты, нитраты, калий и натрий. Более 45 % от

суммарного экспорта нитратного азота в главную реку, приходится на сток руч. Березовый, причем в сухие годы вынос нитратов с водами ручья немного увеличивается. Величина привноса калия и натрия с водами притоков второго порядка из года в год меняется мало и составляет 32–43 % от суммарного стока ионов. Доля экспорта растворенных форм органического углерода доминирует в водах ручьев второго порядка, как в многоводные, так и маловодные годы и составляет, соответственно, 72–78 % и 60–66 % от суммы общего углерода. В водах руч. Медвежий в многоводные годы вынос органической формы углерода преобладает над неорганической. В годы пониженной водности экспорт растворенного углерода более чем на 60 % представлен неорганической формой. Удельный вынос растворенного органического углерода с речными водами, в целом, заметно возрастает в годы повышенной водности (таблица 6). Модуль стока РОУ в многоводные годы в 2–4 раза выше, чем в маловодные и составляет 0,3–2,2 т/км² за июнь–сентябрь. Максимальный вклад РОУ в сток главной реки вносят воды руч. Березовый. Ежегодный привнос РОУ с водами ручья составляет не менее 40 % от суммы всех исследуемых притоков (рисунок 4б). В маловодные годы вынос РОУ снижается, минимальная величина модуля стока (0,2 т РОУ /км²) и относительный вклад установлены для вод руч. Медвежий.

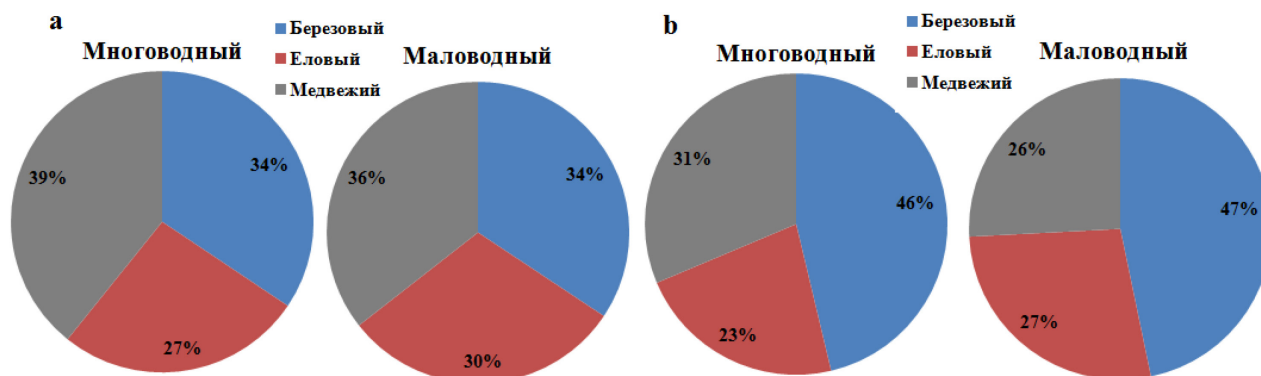


Рисунок 4. Вклад стока растворенных минеральных (а) и органических (б) веществ исследуемых ручьев в р. Правая Соколовка в многоводные и маловодные годы

Figure 4. Export of dissolved mineral (a) and organic (b) substances with waters of the studied streams in the Pravaya Sokolovka River in high-water and low-water years

Таблица 6. Вынос растворенных веществ (т/км²) с водами исследуемых ручьев (1 – Березовый, 2 – Еловый и 3 – Медвежий) в разные по характеру увлажнения годы

Table 6. Export of soluble substances (t/km²) with river waters of the studied streams (1 – Beryozovyi, 2 – Elovyi and 3 – Medvezhiy Stream) in years with different humidity

Компонент	Единицы измерения	Многоводный			Маловодный			Среднее многолетнее		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Слой стока	мм	230	213	181	103	82	60	175	132	101
TDS	т/км ²	6,53	5,82	9,79	3,26	2,29	4,47	5,42	3,69	6,21
POY		1,71	1,03	1,26	0,50	0,32	0,30	1,36	0,58	0,75
PHY		0,50	0,30	1,08	0,29	0,20	0,54	0,41	0,25	0,70
Cl ⁻		0,23	0,19	0,16	0,08	0,07	0,13	0,18	0,07	0,12
S-SO ₄ ²⁻		0,41	0,36	0,41	0,20	0,19	0,20	0,34	0,19	0,26
N-NO ₃ ⁻		0,19	0,12	0,10	0,10	0,04	0,05	0,16	0,04	0,07
Ca ²⁺		1,09	0,73	1,68	0,49	0,32	0,71	0,89	0,32	1,06
Mg ²⁺		0,14	0,09	0,34	0,07	0,04	0,22	0,11	0,04	0,26
K ⁺		0,21	0,19	0,11	0,08	0,09	0,04	0,17	0,09	0,06
Na ⁺		0,32	0,31	0,35	0,16	0,18	0,13	0,27	0,18	0,19
Si		1,17	1,36	1,10	0,54	0,58	0,35	0,98	0,58	0,61
P		0,002	0,003	0,005	0,001	0,002	0,001	0,002	0,003	0,003
Sr	кг/км ²	7,58	4,80	14,1	3,78	3,40	4,36	6,33	3,57	8,33
Al		18,1	11,9	20,6	9,66	8,60	11,0	16,9	10,0	15,3
Fe		9,31	6,00	16,5	6,11	4,53	7,80	9,5	5,50	11,4
Mn		0,21	0,51	0,43	0,18	0,36	0,21	0,22	0,50	0,33
Zn		0,73	1,08	0,47	0,82	0,74	0,45	0,93	0,90	0,58
Cu		0,20	0,14	0,26	0,23	0,09	0,16	0,30	0,10	0,26
Ni		0,10	0,19	0,12	0,10	0,13	0,05	0,14	0,18	0,09
Pb		0,05	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02

В общем удельном стоке РВ суммарная доля микроэлементов составляет около 1 %. По величине выноса микроэлементов с ручьевыми водами можно сгруппировать следующий ряд: Al>Fe>Sr>(Cu, Mn, Ni)>Pb. Во влажные годы максимальная величина привноса растворенных форм микроэлементов в главную реку приходится на сток Медвежьего – более 45 % от общего вклада исследуемых притоков. Исключением был самый многоводный 2020 г., когда модуль стока алюминия и железа снизился в 1,5–4,0 раза относительно других притоков и составил в общем стоке растворенных микроэлементов 18 и 16 % соответственно. С водами ручьев второго порядка ежегодный вклад алюминия и железа в главную реку составляет соответственно 38–48 % и 20–29 % от общего стока растворенных микроэлементов.

Баланс растворенных веществ

В многолетнем цикле баланс практически всех растворенных элементов основного макросостава и кремния отрицательный. Это связано с их высоким содержанием в

подстилающих породах и существенным выносом в годы и периоды высокой водности. В многоводные годы за пределы водосборной площади ручьев второго порядка выносятся более 20 т, третьего порядка – более 85 т растворенных минеральных веществ. В связи с превышением в 2021 г. (маловодный год) влажных выпадений неорганического углерода (гидрокарбонатов), кальция и калия (таблица 3) над выносом (таблица 6) отмечен их положительный баланс в пределах водосборной площади ручьев Еловый и Березовый, а также несущественный вынос с водами руч. Медвежий. Биогенные элементы – азот и фосфор, накапливаются на водосборах в годы пониженной водности, их многолетний баланс положительный. В многоводные годы отрицательный баланс РОУ и нитратов установлен для вод ручьев Березовый и Медвежий. Однако, за счет накопления на водосборной площади органического углерода, нитратного азота и калия в засушливые сезоны, их средний баланс за девятилетний период был положительным или близким к нулю, т.е.

стабильным. Вынос с речными водами тяжелых металлов (Pb и Cu), источником которых являются преимущественно атмосферные воды, меньше их поступления из атмосферы. В основном, все микроэлементы накапливаются наземной экосистемой, что подтверждает регулируемую роль почв в их миграции [15]. Отрицательный баланс в многоводные годы установлен для стронция, алюминия и железа.

Обсуждение

Поступление растворенных веществ с атмосферными осадками

Гидрологический цикл оказывает влияние на соотношение концентраций РВ в атмосферных и почвенно-грунтовых водах и на последующее их поступление в речные воды. Сопоставление модулей поступления РВ с атмосферными осадками и их удельного выноса с речными водами позволяет оценить баланс элементов в исследуемом бассейне и его специфику в различные по увлажнению годы [33]. Роль атмосферных осадков в формировании химического баланса поверхностных вод проявляется, как непосредственно при их выпадении, так и опосредованно – после контакта атмосферных вод с подстилающей поверхностью и последующей их миграции в почвенном профиле. Содержание растворенных веществ в атмосферных осадках незначительно, но они являются основным источником хлоридов, минерального азота, фосфора, тяжелых металлов [34–35]. В районе наших исследований основная масса (80–90 % годовой нормы) атмосферной влаги поступает в летне-осенний период. Представленные здесь результаты (таблица 3) показывают, что концентрации растворенных веществ, поступающих с дождевыми водами, соответствуют региональному фону и аналогичны значениям, характерным для фоновых территорий Российской Федерации [36]. Концентрации макрокомпонентов и микроэлементов в дождевых водах сопоставимы с данными, полученными для других регионов России [37–38]. Средний уровень кислотосодержащих компонентов SO_4^{2-} и NO_3^- можно охарактеризовать как фоновый (таблица 3). Однако стоит отметить, что в отдельные годы поступление с дождями кислотообразующих

анионов, а также меди и свинца достигало нижнего уровня критических пределов, установленных для природных вод лесных ландшафтов [39]. Существенное содержание азота и тяжелых металлов в отдельных дождях может быть связано с дальним переносом загрязняющих веществ из Восточной Азии [17]. Общеизвестным критическим уровнем атмосферного осаждения азота, выше которого прогнозируется значительное выщелачивание нитратов из лесных экосистем, является величина 10 кгN/га в год [35]. Для восточноазиатских регионов с муссонным климатом [40] предложили пороговое значение 5 кгN/га в год. Средний поток влажных осаджений азота в Приморском крае за период 2005–2019 гг. составил 6,5 кгN/га, что превышает критический уровень для Восточной Азии [17]. Избыточное атмосферное осаждение азота может снизить способность лесных экосистем его накапливать, что приводит к насыщению лесной экосистемы азотом и увеличению концентрации нитратного азота в ручьях [4].

Влияние гидрологических условий на содержание и вынос растворенных веществ в речных водах

В результате различий ландшафтной структуры водосборы проявляют разную чувствительность к факторам, контролирующим вынос и растворение химических элементов [2, 7]. Отличия в поведении растворенных веществ между исследуемыми нами водосборами обусловлены смешением различных источников поступления воды в ручьи на фоне сезонных изменений гидрометеорологических условий конкретного года [6, 13, 31]. Концентрация основных ионов, стронция, фосфора и кремния была относительно высока в годы с преобладанием в общем речном стоке базисного питания. Их содержание в водах ручьев различалось соответственно возрасту и составу подстилающих пород на водосборах (рисунок 2). Во влажные годы в гидрографе стока увеличивается доля вод верхних почвенных горизонтов и дождевых. Концентрация литофильных элементов снижается, но незначительно. Наклон линии связи $C-Q$ в межгодовом разрезе не меняется, а характер зависимости определяется особенностями

формирования паводка. На это указывает слабо отрицательный коэффициент b , изменяющийся во всех ручьях от $-0,01$ до $-0,18$. Поведение хлорида, кремния, общего фосфора в водах всех ручьев, а также основных катионов, поступающих в водотоки вторых порядков, демонстрирует хеMOSTАТИЧЕСКИЙ характер при изменении водности потоков ($b \ll -0,1$), и статистически не связан с расходом воды (таблица 4). Такое сходство между поведением РВ в разные фазы увлажненности бассейнов указывает на одни и те же механизмы их мобилизации в многолетнем цикле. Калий и хлориды в существенных количествах (особенно в засушливые сезоны года) содержатся в дождевых водах, поступающих на территорию бассейна р. Правая Соколовка [18], их баланс на всех водосборах положительный или стабильный (таблицы 3 и 6). Это предполагает, что осадки являются наиболее важным источником хлоридов и калия в притоках р. Правая Соколовка. Аналогичные выводы представлены в работах [12, 41]. Концентрация суммарного растворенного фосфора в исследованных водных объектах находится на минимальном уровне и варьирует в диапазоне от 12 до 28 мкг/л в зависимости от конкретного ручья. Возможно, что недостаточная точность аналитических методов не позволяет установить корреляцию между содержанием данного элемента и гидрологическими характеристиками исследуемых рек.

Вынос РВ, связанных преимущественно с выветриванием горных пород, чаще всего превышает их невысокое поступление с атмосферными водами [15, 42]. Незначительная межгодовая вариабельность и отсутствие связи между расходом воды и основными катионами в водах притоков второго порядка возможно связано с функционированием лесных экосистем. Лесные ландшафты склоновых и прибрежных зон могут быть как дополнительным источником, так и основным поглотителем элементов питания: кальция, калия, магния, фосфора, азота [28]. Концентрации гидрокарбонатов, сульфатов и стронция показывают более устойчивое снижение или тенденцию к снижению по мере возрастания водности потока (таблица 4). Величина коэффициента детерминации показывает, что

увеличение расхода воды в руч. Медвежий влияет на снижение 60–74 % РНУ и сульфатов, и только 30–34 % кальция и магния, поступивших в воду ручья. Динамикой водности в ручьях второго порядка объясняется поступление серы (36–60 %), а снижение растворенного неорганического углерода (гидрокарбонатов) и кремния в ручьевых водах более стабильно и достоверно связано с изменением расхода воды в маловодные годы (30–37 %). Несмотря на то, что глубокие подземные горизонты вносят наибольший вклад этих РВ в ручьи, при увеличении расхода воды возможно поступление некоторой части РНУ и кремния с почвенными водами. Отсутствие корреляции между концентрацией кремния и уровнем водности в изученных ручьях может быть также обусловлено спецификой химического анализа. Стандартный калориметрический метод позволяет определить только концентрацию растворенной кремниевой кислоты, тогда как в растворе могут присутствовать и другие формы кремния, такие как поликремниевые кислоты и органический кремний [43]. Метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) позволяет определить суммарную концентрацию растворенного кремния, и в этом случае наблюдается отрицательная корреляция между его содержанием и уровнем водности (например, в руч. Еловый).

Удельный вынос азота с речными водами часто близок к модулю его поступления с атмосферными осадками [44]. В основном, в лесных экосистемах запасы азота лимитированы, что приводит к относительно низким концентрациям в ручьях [38, 45]. Воды изучаемых нами ручьев выделяются более высоким содержанием нитратного азота (рисунок 2). Диапазоны варьирования в ручьях Березовый, Еловый и Медвежий за исследуемый период соответственно составили: 0,63–1,9 мгN/л; 0,14–0,90 мгN/л и 0,11–1,5 мгN/л. Близкие концентрации NO_3 установлены для некоторых рек Карелии, водосборы которых подвержены антропогенному воздействию [44], для относительно чистых рек Приморского края и залесенных бассейнов Восточной Азии [17, 46–47]. Регрессионный анализ связи $C-Q$ показал, что

более динамичные и статистически достоверные изменения концентрации нитратов происходят в водосборах Елового и Медвежьего (таблица 4). Поступление нитратного азота в ручьи положительно связано с расходом, что свидетельствует об обогащении нитратным азотом в периоды высоких вод. Идентичность параметров регрессионной связи $C_{NO_3}-Q$ и коэффициенты детерминации в разные по увлажнению годы могут означать, что приток воды в ручьи и 36–60 % нитратного азота связаны с одним источником поступления – почвенно-растительным покровом водосборов. Как уже отмечалось выше, в период высокой водности основное количество воды поступает в ручьи с почвенными водами [31], соответственно, приток нитрат-ионов в руч. Еловый связан с вымыванием его, в первую очередь, из органогенного горизонта. В меженные периоды около 90 % речного стока формируется за счет верховьев, что связано с различиями дренажных свойств верхней и нижней частей водосбора [24]. Вероятно, благоприятные погодные условия в период прохождения тайфуна (повышение температуры и влажности) под пологом сомкнутых крон пихтово-елово-кедровых лесов способствуют интенсификации микробиологических процессов в органогенных горизонтах, нитрификации и перемещению нитрат-ионов дождевыми водами в нижележащие почвенные горизонты. Посредством дренажной ручейковой сети нитратный азот поступает в русло и его концентрация в устьевой части ручья повышается. В водах Медвежьего выявлена более заметная тенденция к возрастанию концентрации нитратного азота в маловодные годы. Динамичность поведения нитратов в водах руч. Медвежий в течение года с пониженной водностью средняя ($b=0,21$), а коэффициент детерминации показывает, что гидрологический фактор объясняет около 36 % этих изменений. Такое поведение нитратов можно увязать с повышенным атмосферным переносом соединений азота [17] и более высокой, чем, например, в Еловом, долей дождевой компоненты в гидрографе стока в замыкающем створе ручья [6]. Доминирование листовых сообществ с быстрым круговоротом питательных веществ на

склонах водосбора и в прирусловой зоне руч. Медвежий опосредовано (через процессы, связанные с нитрификацией) также способствует поступлению нитрат-ионов в воды ручья во время дождевых событий. Содержание нитратного азота в водах руч. Березовый на 17–40 % выше, чем в других ручьях (рисунок 2). Эти различия могут быть вызваны преобладанием на водосборе старовозрастных кедрово-широколиственных сообществ, произрастающих на крутых склонах. Изучение пространственно-временных изменений выноса нитратного азота из горно-лесных бассейнов Японии показало, что на повышенное содержание этого соединения в речных водах (0,5–3 мгN/л) влияет уровень атмосферного осаджения минерального азота, топографические особенности и доля покрытия водосборов японским кедром [35, 47–48]. По мнению авторов, исследуемые ими ручьи дренируют насыщенные азотом хвойно-лиственные экосистемы, и пространственные колебания концентраций нитратного азота в их водах в первую очередь зависят от крутизны склонов и площади хвойных лесов. В нашем случае концентрации нитратного азота в руч. Березовый выше не только того количества, которое фиксируется в соседних ручьях, но и в реках, протекающих через более урбанизированные территории региона [46]. Это указывает на вымывание избыточного количества минерального азота и возможное насыщение азотом почв под кедрово-широколиственными лесами. Параметры регрессионной зависимости между концентрацией нитратного азота и расходом воды в руч. Березовый демонстрируют неявно выраженную разнонаправленность связи при различной увлажненности водосбора (таблица 4). В многоводные годы знак степенной зависимости $C-Q$ ($b=-0,01$) свидетельствует о снижении концентрации и хеостатическом характере поведения нитратного азота с увеличением расхода воды. В годы пониженной водности заметно увеличение концентраций ($b=0,1$) и меньшая размытость связи $C-Q$. Самые высокие концентрации $N-NO_3$ в маловодные годы были выявлены во время прохождения средних паводков. Вероятным объяснением такого поведения нитрат-ионов являются

различные источники его поступления в зависимости от фона увлажнения, что было хорошо продемонстрировано во время прохождения экстремального паводка [13]. Дренажная сеть бассейна хорошо развита, поэтому объем речного стока и растворенных компонентов формируется со всей водосборной площади. Во время паводковых событий большая часть нитратного азота выщелачивается из подстилки и с внутрпочвенным стоком поступает в руч. Березовый, где разбавляется речными и дождевыми водами. Это отражает постепенный переход к хемотростическому режиму на подъеме паводка. На спаде паводка концентрация нитратов начинает возрастать за счет поступления той их части, которые просочились вглубь почвенного горизонта, а затем, по мере истощения источника, их концентрация в ручье стабилизируется до предпаводочных значений.

Во всех ручьях содержание РОУ, алюминия, железа и марганца заметно возрастает с увеличением расхода воды (таблица 4). РОУ, как правило, в большом количестве содержится в верхних горизонтах почвы и при разной увлажненности водосборов подвержен влиянию изменений бокового притока воды и растворенных веществ. В течение теплого сезона исследуемых лет содержание РОУ в ручьевых водах варьировало от 1 до 12 мг/л. Эта концентрация входит в диапазон, характерный для пресноводных систем [49] и сопоставима с данными, полученными для речных вод небольших горно-лесных водосборов умеренного пояса [50–51]. Общий экспорт РОУ усиливается, если интенсивные осадки происходят в конце длительных засушливых периодов, а в случае частых аномальных явлений среднегодовые значения РОУ определяются взаимосвязью с речным стоком [50]. В изучаемых нами ручьях увеличением речного стока во влажные годы объясняется 64–81 % содержащихся в воде растворимых форм органического углерода. В сухие годы изменчивость РОУ становится более независимой от изменений водности. Соотношением $C-Q$ в водах ручьев второго порядка можно пояснить 46–51 % концентраций РОУ, ручьев третьего порядка – до 75 %. Эти

различия показывают как неоднородное распределение источников поступления органических веществ с водосборных бассейнов, так и обозначенную выше различную реакцию водосборов на выпадающие осадки. В наибольшей степени динамика поведения РОУ проявляется в водах руч. Березовый (рисунок 2, таблица 6). Его водосбор активнее реагирует на характер увлажнения, что проявляется в наибольших различиях миграции РОУ из органогенных и минеральных почвенных горизонтов в контрастные по гидрометеорологическим условиям годы. Механизмы, контролирующие экспорт РОУ с поверхности исследуемых водосборов, аналогичны экспорту нитратного азота. Сезонная же динамика этих компонентов химического состава воды может быть различной [13, 52]. Вероятно, особенное поведение азота по сравнению с РОУ связано с тем, что азот является лимитирующим элементом для биогеохимии и функционирования экосистем, т.е. в отличие от РОУ его количество, как правило, недостаточно.

Содержание алюминия, железа и марганца в ручьях плотно и значимо коррелирует с РОУ [29], что предполагает миграцию этих элементов в ручьи в комплексе с органическими кислотами [53–54]. Наиболее благоприятные условия для образования устойчивых связей Al, Fe и Mn с РОУ складываются на водосборах в более сухие годы. Во влажные годы изменяются окислительно-восстановительные и щелочно-кислотные условия на склонах водосборов и пойменных участках, в ручьях увеличивается содержание взвеси. Это способствует более интенсивному образованию взвешенных и крупно-коллоидных форм Al, Fe и Mn и определяет снижение их растворенных форм в речных водах [55]. В водах руч. Березовый наиболее динамичные изменения концентраций Al, Fe и Mn ($b=0,2-0,3$) и значимая взаимосвязь ($R^2=0,40-0,73$) в ответ на увеличение расхода воды установлены во влажные годы, в руч. Медвежий ($b=0,4-0,6$; $R^2=0,40-0,73$) – в маловодные. Во влажные годы наклон линии связи $C-Q$, установленной для руч. Медвежий, указывает на значительные изменения концентраций Al, Fe и Mn при разной водности, а высокая дисперсия – на то, что их поведение в

речной воде объясняется другими факторами. Например, максимальное снижение концентрации Al и Fe в водах руч. Медвежий в очень влажный летне-осенний период 2020 г. было обусловлено повышенным выносом в ручей продуктов денудации и увеличением мутности, кислотности вод и содержания РОУ [29]. В водах руч. Еловый значительная вариабельность концентраций Fe и Mn при изменении расхода воды и большой разброс точек регрессионной зависимости также установлены в маловодные годы, что может быть отражением биогеохимической обстановки в ландшафтах верховьев водосбора, благоприятной для иллювирирования органического вещества и образования подвижных форм марганца и железа в почвах [15, 21]. Поведение алюминия в водах ручья Еловый аналогично поведению в руч. Березовый, а значимый коэффициент корреляции между алюминием и нитратным азотом [29] может интерпретироваться как их совместная миграция [54].

Заключение

Совместный анализ натурных данных по объему и химическому составу дождевых осадков и вод ручьев трех залесённых водосборов позволил сделать выводы об изменениях содержания, выноса и поведения растворенных веществ в контрастные по увлажнению годы. Применение метода регрессионной модели $C-Q$ демонстрирует сложную динамику и характер поведения растворенных веществ, обусловленных ландшафтными особенностями бассейнов. Выполненные расчеты раскрывают возможности для установления источников поступления РВ и механизмов их миграции на фоне разного увлажнения водосборной площади. По характеру связи концентрации РВ и расхода воды выделены группы химических элементов, содержание которых снижается, возрастает или практически не изменяется с увеличением водности потока. Наблюдения на водосборах с различными ландшафтными условиями показывают, что объем речного стока является важным фактором, объясняющим поведение только некоторых анализируемых компонентов. В основном поведение РВ зависит от пропорции смешения различных источников питания в зависимости от

фона увлажнения. Для установления характера взаимосвязи водного режима и концентраций элементов, тесно связанных с почвенно-растительным блоком, необходимо осуществлять систематический отбор проб в период экстремальных явлений, так как процессы их выщелачивания в большей мере определяются фазой паводка. Гидрологический фактор является определяющим в расчетах выноса веществ с речными водами. Очень важный аспект в миграции химических элементов, включая внутрисистемные условия их образования, накопления и перемещения в прирусловых зонах ручьев и различных частях высотного пояса, заключается в структурной организации лесных экосистем, динамике гидротермического режима и топографической сложности горных бассейнов.

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, обеспечивающей создание систем регистрации данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (регистрационный номер: 123030300031-6).

Acknowledgements

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 124012400285-7 and 125021302113-3) and as part of the most important innovative project of national importance "Development of a system for groundbased and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems" (Registration number: 123030300031-6).

Литература / References

1. Авессаломова И.А., Савенко А.В., Хорошев А.В. Ландшафтно-геохимическая контрастность среднетаежных речных бассейнов как фактор формирования ионного стока // Вестник МГУ. Сер. 5: География. 2013. № 4. С. 3–10.
Avessalomova I.A., Savenko A.V., Khoroshev A.V. Andscape-geochemical contrasts of the middle taiga river basins as a factor of the ion discharge formation. Lomonosov Geography Journal, 2013, no 4, pp. 3–10. (In Russian; abstract in English).
2. Алекин О.А., Бражникова Л.В. Сток растворенных веществ с территории СССР. М.: Наука, 1964. 144 с.
3. Godsey S. E., Hartmann J. Kirchner, J. W. Catchment chemostasis revisited: water quality responds differently to variations in weather and climate. Hydrological Processes, 2019, vol.33, pp. 3056–3069. DOI:10.1002/hyp.13554.
4. Inagaki Y., Sakai H., Shinomiya Y., Yoshinaga S., Torii A., Yamada, T., Noguchi K., Morishita T., Fujii K. Effects of climate and acidic deposition on interannual variations of stream water chemistry in forested watersheds in the Shimanto River Basin, southern Japan. Ecological Research, 2024, DOI:10.1111/1440-1703.12441.
5. Смирнов М.П. Органические вещества и минерализация речных вод гор России и сопредельных стран // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 1. С. 99–106. DOI: 10.31857/S2587-55662019199-106.
Smirnov M.P. Organic matter and mineralization of river waters in mountains of Russia and adjacent countries Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya [Regional Research of Russia], 2019, no 1, pp. 99–106 (In Russian; abstract in English).
6. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупаков С.Ю. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 6. С. 126–140. DOI: 10.31857/S2587-556620196126-140.
Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Shamov V.V. Analysis of natural tracers and genetic runoff components in mixing models: case study of small basins in Primor'e. Water Resources, 2016, vol. 43, iss. 4, pp. 629–639.
7. Herndon E. M., Dere A. L., Sullivan P. L., Norris D., Reynolds B., Brantley S. L. Landscape heterogeneity drives contrasting concentration–discharge relationships in shale headwater catchments. Hydrol. Earth Syst. Sci., 2015, vol.19, pp. 3333–3347. DOI:10.5194/HESS-19-3333-2015.
8. Sullivan P.L., Stops M.W., Macpherson G.L., Li L., Hirmas D.R., Dodds W.K. How landscape heterogeneity governs stream water concentration-discharge behavior in carbonate terrains (Konza Prairie, USA). Chem. Geol., 2019, vol.527, 118989. DOI/10.1016/j.chemgeo.2018.12.002.
9. 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 // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 2. С. 90–101. Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 2. С. 90–101.
Boldeskul A.G., Shamov V.V., Gartsman B.I., Kozhevnikova N.K. Ionnyi sostav geneticheskikh tipov vod malogo rechnogo basseina: statsionarnye issledovaniya v tsentral'nom Sikhote-Aline [Main ions in water of different genetic types in a small river basin: case experimental studies in Central Sikhote-Alin]. Tikhookeanskaya Geologia [Pacific Geology], 2014, vol. 33, iss. 2, pp. 90–101. (In Russian; abstract in English).
10. Лупаков С.Ю., Бугаец А.Н., Шамов В.В. Применение различных структур модели HBV для исследования процессов формирования стока на примере экспериментальных водосборов // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. №4. С. 417–426. DOI: 10.31857/S032105962104012X.

- Lupakov S.Yu., Bugaets A.N., Shamov V.V. Application of different structures of HBV model to studying runoff formation processes: case study of experimental catchments. *Water Resources*, 2021, vol. 48, no 4, pp. 512–520. DOI: 10.31857/S032105962104012X.
11. Bugaets A., Gartsman B., Gubareva T., Lupakov S., Kalugin A., Shamov V., Gonchukov L. Comparing the runoff decompositions of small experimental catchments: end-member mixing analysis (EMMA) vs. Hydrological modelling. *Water*, 2023, v. 15, no 4, pp. 752–774. DOI: 10.3390/w15040752.
 12. Knapp J. L. A., Li L., Musolff A. Hydrologic connectivity and source heterogeneity control concentration–discharge relationships. *Hydrological Processes*, 2022, v. 36, Is.9, e14683. DOI:10.1002/hyp.14683.
 13. Шамов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Гарцман Б.И., Лупаков С.Ю., Губарева Т.С., Кожевникова Н.К., Юрченко С.Г. Гидрохимический портрет экстремального дождевого паводка на малых водосборах южного Сихотэ-Алиня, Дальний Восток России // Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен (Санкт-Петербург, 5–14 октября 2023 г.). Санкт-Петербург: СПГУ, 2023. С. 666–671.
 14. Дюкарев В. Н., Кожевникова Н. К. Эколого-защитный потенциал горных ландшафтов в условиях антропогенной динамики структуры и продуктивности лесов Южного Сихотэ-Алиня // Фундаментальные исследования. 2012. №9–2. С. 288–293. EDN: PBHSWL.
Dyukarev V. N., Kozhevnikova N. K. Functional potential of mountain landscapes in connection with anthropogenic dynamics of structure and productivity of southern sichote-alin forests. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2012. No 9–2, pp. 288–293. (In Russian; abstract in English).
 15. Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия, функционирование и динамика горных геосистем Сихотэ-Алиня (юг Дальнего Востока России). Владивосток: Дальнаука. 2005. 253 с.
Arzhanova V. S., Yelpatyevsky P. V., Geochemistry, Functioning, and Dynamics of Rock Geosystems of Sikhote-Alin (Southern Russian Far East). *Publ. Dalnauka, Vladivostok*, 2005. 253 p. (In Russian).
 16. Кожевникова Н.К., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Лупаков С.Ю., Шамов В.В. Водная миграция макроэлементов в хвойно-широколиственных лесах Сихотэ-Алиня // Сибирский лесной журнал. 2017. № 3. С. 60–73. DOI: 10.15372/SJFS20170306.
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. *Sibirskiy Lesnoy Zhurnal*, 2017, to. 3. pp. 60–73. DOI: 10.15372/SJFS20170306. (In Russian).
 17. Zhigacheva E. S., Sase H., Nakata M., Ohizumi T., Gromov S. A., Takahashi M. Stream water acidification in the Far East of Russia under changing atmospheric deposition and precipitation patterns. *Limnology*, 2022, V. 23, no. 3, pp. 415–428. DOI: 10.1007/s10201-022-00696-0.
 18. Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Шамов В.В. Формирование кислотности дождевых вод в залесенном бассейне Сихотэ-Алинской горной области // Геохимия. 2022. Т. 67. № 12. С. 1297–1311. DOI: 10.31857/S001675252211005X.
Kozhevnikova N.K., Boldeskul A.G., Lutsenko T.N., Gubareva T.S., Lupakov S.Yu., Shamov V.V. Formation of rainwater acidity in the forested basin of the Sikhote Alin mountain region *Geochemistry International*, 2022, vol. 60, no 12, pp. 1298–1311. DOI: 10.1134/S0016702922110052.
 19. Кондратьев И.И., Мезенцева Л.И., Гришина М.А. Зависимость влажных выпадений сульфатов и нитратов в Приморском крае от траектории циклонов // География и природ. ресурсы. 2020. № 2 (161). С. 135–143. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(135-142).
Kondratyev I.I., Grishina M.A., Mezentseva L.I. Dependence of wet depositions of sulfates and nitrates in Primorskii krai on cyclone trajectories. *Geography and Natural Resources*. 2020, v. 41, no 2, pp. 187–194.
 20. Дымов А. А. Химический состав водотоков в коренном еловом и производном лиственнично-хвойном лесах // Вода: химия и экология. 2013. № 4. С. 97–101.

- Dymov A. A. Himicheskij sostav vodotokov v korennom elovom i proizvodnom listvenno-hvojnom leash [Chemical composition of water streams in native spruce and secondary deciduous-coniferous forests]. Voda: himiya i ekologiya, 2013, no 4, pp. 97–101. (In Russian; abstract in English).
21. Луценко Т.Н., Аржанова В.С. Братская С.Ю. Растворенное органическое вещество лизиметрических вод горно-лесных почв Южного Сихотэ-Алиня // Почвоведение. 2014. №6. С. 705–715. DOI: 10.7868/S0032180X14060070.
Lutsenko T.N., Arzhanova V.S., Bratskaya S.Y. Dissolved organic matter in lysimetric water of mountain forest soils in the southern Sikhote Alin, Eurasian Soil Science, 2014, vol. 47, no 6, pp. 581–590. DOI: 10.7868/S0032180X14060070.
22. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов: гидрофизический подход к количественной морфологии. М.: Издательство. иностранной литературы, 1948. 158 с.
23. Жильцов А.С. Гидрологическая роль горных хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2008. 332 с.
Zhil'tsov A.S. Hydrological role of mountain coniferous-broad-leaved forests of the Southern Primorye. Vladivostok, Publ. Dal'nauka, 2008. 332 p. (In Russian).
24. Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 589–599. DOI: 10.7868/S0321059615060048.
Gartsman B.I., Shamov V.V. Field studies of runoff formation in the Far East Region based on modern observational instruments. Water Resources, 2015, vol. 42, iss. 6, pp. 766–775. DOI: 10.7868/S0321059615060048.
25. Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Лупаков С.Ю., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Гончуков Л.В., Голодная О.М., Краснопеев С.М., Кожевникова Н.К. Цифровое почвенное картографирование для целей гидрологического моделирования на примере экспериментальных водосборов (юг Приморского края) // Почвоведение. 2021. Т. 55. № 9. С. 1085–1096. DOI: 10.31857/S0032180X21050051.
Bugaets A.N., Pshenichnikova N.F., Tereshkina A.A., Lupakov S.Yu., Gartsman B.I., Shamov V.V., Gonchukov L.V., Golodnaya O.M., Krasnopeev S.M., Kozhevnikova N.K. Digital soil mapping for hydrological modeling by the example of experimental catchments in the south of Primorsky Krai. Eurasian Soil Sci., 2021, v. 54, no. 9, pp. 1375–1384. DOI: 10.31857/S0032180X21050051.
26. Сапожников А.П., Селиванова Г.А., Ильина Т.М., Дюкарев В.Н., Бутовец Г.А., Гладкова Г.А., Гавренков Г.И., Жильцов А.С. Почвообразование и особенности биологического круговорота веществ в горных лесах Южного Сихотэ-Алиня (на примере Верхнеуссурийского стационара). Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1993. 270 с.
27. Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Орляковский А.В., Тарбеева А.М., Шамов В.В., Шекман Е.А. Формы линейной организации склонового стока в среднегорье (на примере Сихотэ-Алиня) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 123–132. DOI: 10.31857/S0321059620020042.
Gartsman B.I., Gubareva T.S., Lupakov S.Yu., Shamov V.V., Shekman E.A., Orlyakovskii A.V., Tarbeeva A.M. The forms of linear structure of overland flow in medium-height mountain regions: case study of the Sikhote-Alin. Water Resources, 2020, vol. 47, iss. 2, pp. 179–188. DOI: 10.31857/S0321059620020042.
28. Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н. Состав почвенных вод горно-лесных ландшафтов верхней Уссури и оценка выноса химических элементов // Биота и среда природных территорий. 2023. Т. 11. № 2. С. 62–74. DOI: 10.25221/2782-1978_2023_2_4.
Kozhevnikova N.K., Boldeskul A.G., Lutsenko T.N. Composition of soil water in mountain forest landscapes of the upper Ussuri river and the estimation of export of chemical elements. Biota and

- environment of natural areas, vol 11, no 2, pp. 62–74. DOI: 10.25221/2782-1978_2023_2_4. (In Russian; abstract in English).
29. Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н., Шамов В.В., Еловский Е.В., Касуров Д.А. Микроэлементы в речных водах горнолесных бассейнов (юг Дальнего Востока России) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. №6. С. 190–205. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3548.
Kozhevnikova N.K., Boldeskul A.G., Lutsenko T.N., Shamov V.V., Elovskiy, E.V., Kasurov D.A. Microelements in river water of mountain-forest basins (southern Russian Far East). Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering, 2022, vol. 333, no 6, pp. 190–205. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3548. (In Russian; abstract in English).
30. Шамов В.В., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н., Кожевникова Н.К., Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Шекман Е.А., Бурдуковский М.Л., Юрченко С.Г. Динамика макроэлементного состава природных вод ландшафтов южной тайги (на примере экспериментального водосбора ручья Еловый, юг Дальнего Востока России) // Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии» (г. Благовещенск, 23–24 октября 2019 г.). Благовещенск: ДГАУ, 2019. С. 129–142.
31. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Болдескул А.Г. Кожевникова Н.К. Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 97–108. DOI: 10.3103/S1068373915030097.
Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K., Lupakov S.Yu. Runoff components of small catchments in Sikhote-Alin: summarizing the results of field measurements and tracer modeling. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya, 2019, iss. 6, pp. 126–140. (In Russian; abstract in English).
32. Musolf A., Schmidt C., Selle B., Fleckenstein J. H. Catchment controls on solute export. *Advances in Water Resources*, 2015, v. 86, pp. 133–146. DOI:10.1016/J.ADVWATRES.2015.09.026.
33. Савичев О. Г., Иванов А. О. Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // Известия РАН. Серия географическая. 2010. № 1. С. 63–70. EDN: MEGKED.
Savichev O. G., Ivanov A. O. Atmospheric losses in the middle Ob river basin and their influence on a hydrochemical runoff of the river, *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya* [Regional Research of Russia], 2010, no 1, pp. 63–70. (In Russian; abstract in English).
34. Лозовик П. А., Галахина Н. Е., Кравченко И. Ю. Современное состояние водных объектов Карелии в результате воздействия природных, климатических и антропогенных факторов // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 24–39. DOI: 10.17076/lim309.
Lozovik P. A., Galahina N. E., Kravchenko I. Yu. Current status of water bodies of Karelia as a result of natural, climatic and anthropogenic factors' impact. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2017, no 3, pp. 24–39. DOI: 10.17076/lim309. (In Russian; abstract in English).
35. Sase H, Takahashi M, Matsuda K, Yamashita N, Tsunogai U, Nakagawa F, Morohashi M, Yotsuyanagi H, Ohizumi T, Sato K, Kurokawa J, Nakata M. Nitrogen saturation of forested catchments in central Japan—progress or recovery?, *Soil Sci Plant Nutr.*, 2021, V. 68, pp 5–14. DOI:10.1080/00380768.2021.1991228.
36. Свистов П.Ф., Першина Н.А., Павлова М.Т. Атмосферные осадки: химический состав и кислотность // Природа. 2015. №6 (1198). С. 28–36.
Svistov P.F., Pershina N.A., Pavlova M.T. Atmospheric precipitation: chemical composition and acidity. *Priroda*, 2015, no 6 (1198), pp. 28–36. (In Russian; abstract in English).

37. Ершов В.В., Исаев Л.Г., Поликарпова Н.В. Содержание тяжелых металлов в атмосферных выпадениях в окрестностях заповедника «Пасвик» // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22. № 1. С. 83–89. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-83-89.
Ershov V.V., Isaeva L.G., Polikarpova N.V. The content of heavy metals in atmospheric deposition in the Pasvik state nature reserve vicinity. Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2019, v.22, no 1, pp. 83–89. (In Russian; abstract in English).
38. Робакидзе Е. А., Торлопова Н. В., Бобкова К. С. Химический состав жидких атмосферных осадков в старовозрастных ельниках средней тайги // Геохимия. 2013. № 1. С. 72–83. DOI: 10.7868/S001675251211009X.
Robakidze E.A., Torlopova N.V., Bobkova K.S. Chemical composition of wet precipitation in old-growth middle-taiga spruce stands. Geochemistry, 2013, no 1, pp. 72–83. DOI: 10.7868/S001675251211009X. (In Russian; abstract in English).
39. Лукина Н.В., Ершов В.В., Горбачева Т.Т., Орлова М.А., Исаева Л.Г., Тебенькова Д.Н. Оценка состава почвенных вод северотаежных хвойных лесов фоновых территорий индустриально развитого региона // Почвоведение. 2018. № 3. С. 284–296. DOI: 10.7868/S0032180X18030036.
Lukina N. V., Ershov V. V., Gorbacheva T. T., Orlova M. A., Isaeva L. G., Teben'kova D. N. Assessment of soil water composition in the northern taiga coniferous forests of background territories in the industrially developed region, Eurasian Soil Science, 2018, vol. 51, no 3, pp. 285–297. DOI: 10.1134/S1064229318030079.
40. Fang Y., Gundersen P., Vogt R. D., Koba K., Chen F., Chen X. Y., & Yoh M. Atmospheric deposition and leaching of nitrogen in Chinese forest ecosystems. Journal of Forest Research, 2011, vol. 16, no 5, pp. 341–350. DOI:10.1007/s10310-011-0267-4.
41. Musolff A., Zhan Q., Dupas R., Minaudo C., Fleckenstein J. H., Rode M., Dehaspe J., Rinke K. Spatial and Temporal Variability in Concentration-Discharge Relationships at the Event Scale. Water Resources Research, 2021, v. 57, no.10, e2020WR029442. DOI:10.1029/2020WR029442.
42. Godsey S. E., Kirchner J. W., Clow D. W. Concentration discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments. Hydrological Processes, 2009, v.23, iss. 13, pp.1844–1864. DOI:10.1002/HYP.7315.
43. Рыжаков А.В., Вампиров В.В., Степанова И.А. Кремний в поверхностных водах гумидной зоны (на примере водных объектов Карелии) // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 3. С. 52–60.
Ryzhakov, A.V.; Vampirov, V.V.; Stepanova, I.A. Silicon in the surface waters of the humid zone (on the example of Karelian water bodies). Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2019, no 3, pp. 52–60. (In Russian; abstract in English).
44. Лозовик П. А., Бородулина Г. С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 6. С. 694–704. EDN: KXLFTL.
Lozovyyk, P.A., Borodulina G.S. Nitrous compounds in surface and underground waters of Karelia. Water Resources, 2009, vol. 36, no 6, pp. 672–682. DOI: 10.1134/S0097807809060062.
45. Адамович Т. А., Скугорева С. Г., Товстик Е. В. Изучение особенностей химического состава водных объектов заповедной территории для использования в качестве регионального фона // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 89–96. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-1-089-096.
Adamovich T.A., Skugoreva S.G., Tovstik E.V., Ashikhmina T.Ya. Study of the chemical composition of water bodies protected area for use as a regional background. Theoretical and Applied Ecology, 2020, no. 1. pp. 89–96. (In Russian).
46. Шулькин В.М., Качур А.Н., Кубай Б.В. Межгодовая изменчивость основных показателей качества вод рек Приморского края в 2001–2017 гг. // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 73–81. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-1-73-81.

- Shul'kin V.M., Kachur A.N., Kubaj B.V. Interannual variability of the main parameters of river water quality in Primorsky krai. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2021, no 1, pp. 73–81. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-1-73-81. (In Russian; abstract in English).
47. Watanabe M. S., Hasegawa M. S., Koshikawa M. K., Takamatsu T., Kohzu A., Imai A., Hayashi S. Coniferous Coverage as Well as Catchment Steepness Influences Local Stream Nitrate Concentrations within a Nitrogen-saturated Forest in Central Japan. *Science of the Total Environment*, 2018, v.636, pp. 539–546. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.04.307.
48. Li Zh., Fu D., Kasahara T., Chiwa M. Long-term Changes in Sulfate and Nitrate Concentrations in Streams in Western Japan Between 1986 and 2023 in Response to Changes in Sulfur and Nitrogen Deposition from the Atmosphere. *Water Air Soil Pollut*, 2024, is. 235, p. 410. DOI:10.1007/s11270-024-07206-1.
49. Raymond P. A., Saiers J. E. Event controlled DOC export from forested watersheds // *Biogeochemistry*. 2010, v. 100, no 1, pp. 197–209. DOI: 10.1007/s10533-010-9416-7.
50. Blaurock K., Beudert B., Gilfedder B. S., Fleckenstein J. H., Peiffer S., Hopp L. Low hydrological connectivity after summer drought inhibits DOC export in a forested headwater catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 2021, vol. 25, pp. 5133–5151. DOI:10.5194/hess-25-5133-2021.
51. Takagi M., Haga H. Carbon and nitrogen exports from forested headwater catchment in southwestern Japan. *Biogeochemistry*, 2019, v. 145, pp. 35–46. DOI:10.1007/s10533-019-00588-z.
52. Dupas R., Musolff A., Jawitz J. W., Rao P. S. C., Jäger C. G., Fleckenstein J. H., Rode M., Borchardt D. Carbon and nutrient export regimes from headwater catchments to downstream reaches. *Biogeosciences*, 2017, v.14, pp. 4391–4407. DOI:10.5194/BG-14-4391-2017.
53. Левшина С.И. Распределение железа в поверхностных водах бассейна Среднего и Нижнего Амура // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39. № 4. С. 377–384. EDN: OZKFOB.
Levshina S.I. Iron distribution in surface waters in the middle and lower Amur basin, *Water Resources*, 2012, vol. 39, no 4, pp. 375–383. DOI: 10.1134/S0097807812040082.
54. Толпешта И.И. Соединения алюминия в поверхностных водах и почвах различных экосистем южной тайги верхней части бассейна р. Межи // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39. № 1. С. 99–110.
Tolpeshta I.I. Aluminum compounds in surface waters and soils of different southern taiga ecosystems in the upper part of the Mezha R. *Water Resources*, 2012, vol. 39, no 1, pp. 125–135. DOI: 10.1134/S0097807811050149.
55. Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Еловский Е.В. Влияние коагулирования фильтров на определение концентрации истинно-растворенных и коллоидных форм миграции химических элементов в речных водах // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49 №1. С. 91–102. DOI: 10.31857/S0321059622010163.
Shul'kin V.M., Bogdanova, N.N., Elovskiy E.V. Effect of filter clogging on the determination of concentrations of chemical elements migrating in river water as components of true solutions or in colloidal, *Water Resources*, 2022, vol. 49, no 1, pp. 122–133. DOI: 10.1134/S009780782201016X.

Поступила в редакцию / Received 16.02.2025

Принята к публикации / Accepted 02.03.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кожевникова Надежда Константиновна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Федеральный научный центр Биоразнообразия ДВО РАН, г. Владивосток, Россия, SPIN-код: 1076-5972, AuthorID: 559806, <https://orcid.org/0000-0003-0186-5906>, e-mail: nkozhevnikova@biosoil.ru

Болдескул Анна Геннадьевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия, SPIN-код: 1058-4692, AuthorID: 70777, <https://orcid.org/0000-0001-9014-2405>, e-mail: boldeskul@tigdvo.ru

Луценко Татьяна Николаевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия, SPIN-код: 5508-3040, AuthorID: 67122, <https://orcid.org/0000-0002-5433-8248>, e-mail: luts@tigdvo.ru

Юрченко Светлана Григорьевна, кандидат географических наук, научный сотрудник, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия, SPIN-код: 4932-2355, AuthorID: 170322, <https://orcid.org/0000-0003-2008-1103>, e-mail: yurchenko@tigdvo.ru

Еловский Евгений Васильевич, научный сотрудник, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, Россия, SPIN-код: 7374-7856, AuthorID: 743222, Scopus AuthorID: 55772663900, <https://orcid.org/0000-0002-1099-5844>, e-mail: matri@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda K. Kozhevnikova, Ph. D. (Biology), researcher, Federal Scientific Center for Biodiversity FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN-code: 1076-5972, AuthorID: 559806, <https://orcid.org/0000-0003-0186-5906>, e-mail: nkozhevnikova@biosoil.ru

Anna G. Boldeskul, Ph. D. (Geography), senior researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN-code: 1058-4692, AuthorID: 70777, <https://orcid.org/0000-0001-9014-2405>, e-mail: boldeskul@tigdvo.ru

Tatyana N. Lutsenko, Ph. D. (Geography), senior researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN-code: 5508-3040, AuthorID: 67122, <https://orcid.org/0000-0002-5433-8248>, e-mail: luts@tigdvo.ru

Svetlana G. Yurchenko, Ph. D. (Geography), Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN-code: 4932-2355, AuthorID: 170322, <https://orcid.org/0000-0003-2008-1103>, e-mail: yurchenko@tigdvo.ru

Evgeniy V. Elovskiy, researcher, Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN-код: 7374-7856, AuthorID: 743222, Scopus AuthorID: 55772663900, <https://orcid.org/0000-0002-1099-5844>, e-mail: matri@list.ru