

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ СТОК МАЛЫХ РЕК
ВЕРХНЕУССУРИЙСКОГО ЛЕСНОГО СТАЦИОНАРА**

Н.К. Кожевникова¹, А.Г. Болдескул², Т.Н. Луценко², С.Ю. Лупаков², В.В. Шамо²

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

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

В статье представлены статистически достоверные данные по динамике выноса химических макрокомпонентов с речным стоком в малых бассейнах верховья р. Уссури. Для выявления генезиса формирования ионного состава вод в различные фазы водного режима был проведен корреляционный анализ и построены простые регрессионные зависимости. Это позволило сделать выводы о связи суммарной минерализации и отдельных компонентов геохимического стока с расходами воды, а также установить зависимости величины общей минерализации рек от концентрации основных анионов и катионов.

**HYDROCHEMICAL RUNOFF OF SMALL RIVERS OF
VERHNEUSSURIYSKY FOREST EXPERIMENTAL STATION**

N.K. Kozhevnikova¹, A.G. Boldeskul², T.N. Lutsenko², S.Yu. Lupakov², V.V. Shamov²

¹Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity
of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,

159 Stoletiya Vladivostoka Avenue, Vladivostok, 690022, Russia. E-mail: nkozhevnikova@ibss.dvo.ru

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

The article presents statistically reliable data on riverine dissolved macro-components dynamics transport in small catchments of the Ussuri River headwaters. In order to identify the generation of the ionic composition of water in different phases of the water regime, a correlation analysis was performed and simple regression equations were constructed. This made it possible to confirm the relationship between total mineralization and individual components of geochemical flow with water runoff, and also to establish the dependences of the total water mineralization on the main anions and cations content.

Введение

Ионный сток горных рек и ручьев западного макросклона южного Сихотэ-Алиня дает представление о количестве растворенных веществ и качестве воды, поступающей в речную систему верховья р. Уссури с залесенных бассейнов. В химическом составе вод данных рек наиболее информативно отражаются взаимосвязи между компонентами ландшафта и интенсивность происходящих в них биогеохимических процессов, природные и антропогенные воздействия на их экосистемы. Несмотря на давнюю историю изучения малых рек Приморского края, их гидрохимический сток изучен недостаточно. Опубликованные к настоящему времени данные дают необходимую информацию об ионном составе вод рек Дальнего Востока

с водосборной площадью более 60 км² (Шулькин и др., 2009; Форина, Шестеркин, 2010; Шестеркин, Костомарова, 2017). Гидрохимическая изученность рек первых порядков, дренирующих склоны с различными по составу и возрасту лесами, весьма низкая. В верховьях р. Уссури комплексные геохимические исследования проводились в конце прошлого века (Аржанова, Елпатьевский, 2005). Основная цель данной работы – расчет ионного стока на основе семилетнего ряда данных, собранных на пяти малых речных водосборах Верхнеуссурийского лесного стационара (ВУС), а также установление: 1) взаимосвязей суммарной минерализации и отдельных компонентов геохимического стока с расходами воды; 2) зависимости величины общей минерализации рек от концентрации основных анионов и катионов.

Материалы и методы

Верхнеуссурийский стационар расположен в бассейне р. Соколовка, которая относится к верхнему течению р. Уссури. Истоки р. Уссури расположены в южной части горной системы Сихотэ-Алинь, на склонах г. Снежная (1652 м). По абсолютным высотам Сихотэ-Алинь относится к среднегорным массивам с климатически обусловленной высотной поясностью растительного покрова и наиболее реальным уровнем ландшафтной структуры здесь является малый речной бассейн, в пределах которого можно исследовать закономерности формирования и трансформации химического состава и водно-миграционных потоков вещества между лесными сообществами и водотоками разных порядков. Исходя из высотной дифференциации растительного покрова Южного Сихотэ-Алиня, на водосборной площади верхнего участка р. Уссури (от истоков до замыкающего створа у с. Новомихайловка) возможно выделение речных бассейнов в трех высотных поясах (Кожевникова, Дюкарев, 2011). Все бассейны имеют густую речную сеть, а коэффициент речного стока здесь тесно связан с долей хвойных лесов, произрастающих на склонах речных долин. Исследуемый нами бассейн р. Правая Соколовка, всю площадь (45 км²) которого занимает ВУС, входит в пояс среднегорных кедрово-еловых лесов. Здесь насчитывается около 33 малых рек, в основном, первого порядка, с высокими модулями стока. Основные притоки впадают в р. Правая Соколовка с левой стороны: ручьи Трехстенный, Еловый, Безымянный, Березовый, Кедровый. Наиболее крупным правосторонним притоком является ручей Медвежий ключ (Кожевникова и др., 2017). Ручьи берут начало в отрогах Сихотэ-Алиня. Наивысшие точки в верховьях достигают отметки 1150 м над уровнем моря. Ландшафтно-геохимические процессы в лесных экосистемах ВУС формируются под влиянием восточноазиатского муссона умеренных широт. Зима здесь слишком холодная для таких широт и малоснежная, лето теплое и влажное. Среднегодовая температура воздуха варьирует от –0,8 до 2,4°C. Годовая сумма осадков составляет 600–1000 мм, около 80% выпадает в летне-осенний период. Среднее число дней с осадками различной величины в год составляет 125–190 (Жильцов, 2008; Кожевникова, 2009). Геологическая история бассейна реки Правой Соколовки достаточно сложная. Правый борт ее долины слагают более древние породы основного состава ранней и средней юры (Государственная геологическая карта, 1970). Левый борт представлен более молодыми породами среднего и кислого состава позднего мела. По своим природным характеристикам территория типична для среднегорного пояса южного Сихотэ-Алиня с господством широколиственно-кедровых и пихтово-еловых лесов (Жильцов, 2008). Основной фон почвенного покрова, в зависимости от позиции в ландшафте, составляют типичные буроземы разной степени оподзоленности.

Строение органофила и гумусное состояние почв, динамика и интенсивность круговорота веществ тесно связаны с фитомассой лесных сообществ (Сапожников и др., 1993).

Воду на химический анализ отбирали систематически в течение сезона с охватом различных периодов увлажнения. Всего за 2011–2018 гг. было отобрано и проанализировано 588 речных, 105 дождевых проб воды. Атмосферные осадки для химического анализа собирали в устойчивые к кислой среде полиэтиленовые конусообразные пробоотборники. Количество осадков регистрировалось на 2-х метеостанциях непосредственно на ВУС. Отбор гидрохимических проб производился на пяти створах с одновременным измерением температуры, электропроводности и расходов воды. В полевой лаборатории в нефилтрованной пробе измеряли pH и потенциометрическим титрованием по стандартной методике определяли содержание гидрокарбонат-иона. Затем воды фильтровали через фильтр с диаметром пор 0.45 мкм и готовили к дальнейшему анализу. Содержание главных анионов (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) определяли на жидкостном хроматографе Shimadzu LC10Avp, главных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) – на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA-6800. Определение кремния (Si) проводили спектрофотометрическим методом, а содержание растворенного органического углерода (POУ) в воде – с помощью TOC-анализатора (Shimadzu TOC-VCPN).

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

Речной сток был рассчитан с применением кривых $Q = f(H)$ на основании измеренных расходов (Q) и уровней (H) воды. Поступление химических элементов с дождевыми водами и геохимический (ионный) сток за необходимый период рассчитывали по формуле:

$$V = 0,001CY,$$

где V – геохимический (ионный) сток, т/км²; C – суммарная минерализации в мг/л; Y – количество осадков или суммарный слой речного стока за период в мм; 0,001 – коэффициент согласованности единиц измерения.

Результаты и обсуждение

Площадь исследуемых нами водосборов составила ~ 1–8 км², а средний за 2011–2018 гг. модуль речного стока изменялся от 6 до 12 л/с·км² (табл. 1). Практически весь ионный сток поступает с водосборной площади, занятой хвойно-широколиственными лесами различного возраста и состава. Взаимообусловленный комплекс ландшафтных факторов, формирующих геохимическую обстановку, отражается на химическом составе право- и левобережных притоков реки Правой Соколовки. В первую очередь – это различия возраста и состава материнских пород.

Для рек исследуемого региона ведущая роль в суммарном стоке химических веществ принадлежит ионному стоку растворенных макроэлементов (Елпатьевский, 1993). Установлено, что на величину ионного стока в теплый период года оказывает влияние увлажненность предшествующего осенне-зимнего периода и длительность межени между паводками. По степени минерализации воды рек являются ультрапресными, по преобладающим ионам, в соответствии с классификацией О.А. Алекина (1970), практически все исследуемые воды рек относятся к гидрокарбонатно-кальциевому типу. Концентрации макроэлементов левобережных притоков реки Правой Соколовки сходны (табл. 2), их минерализация

Таблица 1

Ландшафтная структура исследуемых бассейнов ВУС

Бассейн – створ	Площадь, км ²	Модуль стока, л/с·км ²	Растительность	Почва и почвообразующие породы; их возраст
Еловый–ПЛ4	0,77	9,85	Пихтово-кедрово-еловые и вторичные хвойно-лиственные леса; возраст 50–140 лет	Бурые горнолесные и буротасажные почвы на эффузивах кислого состава; поздний меловой период
Резервный	1,05	11,0	Кедрово-елово-широколиственные леса; возраст 120–260 лет	
Еловый–Устье	3,47	8,83	Кедрово-широколиственные леса; возраст 60–140	
Березовый	3,10	–	Кедрово-елово-широколиственные леса; возраст 60–260 лет	
Медвежий ключ	7,67	9,55	Кедрово-елово-широколиственные; вторичные послепожарные леса; возраст 50–140 лет	Бурые горнолесные и буротасажные почвы на песчаниках, алевролитах с обломками и глыбами известняков, кремния; юра и триас

находится в диапазоне 20–45 мг/л, а кислотность 6,5–7. Исключением является водосбор верхнего течения руч. Еловый в створе ПЛ4. Его воды более кислые, с низким содержанием гидрокарбонатов и кальция, а по преобладающему аниону относятся к сульфатному классу (Болдескул и др., 2014; Кожевникова и др., 2017). Наиболее минерализованным является правый приток – руч. Медвежий ключ. Его воды более щелочные за счет высокого содержания гидрокарбонатов, кальция и магния (табл. 2).

Выполненные расчеты показали, что на поверхность ВУС в течение вегетационного периода поступает от 0,7 до 1,2 т органических и более 1,5–3 т минеральных веществ (табл. 3). Вынос органических веществ с речными водами меньше их

Таблица 2

Средние значения гидрохимических компонентов в исследуемых реках за теплый сезон 2011–2018 гг.

Компонент	Медвежий ключ		Березовый		Еловый-ПЛ4		Резервный		Еловый-Устье	
	n = 90		n = 72		n = 192		n = 73		n = 157	
	среднее	$\pm \sigma^*$	среднее	+ σ	среднее	+ σ	среднее	+ σ	среднее	+ σ
pH	7,38	0,22	6,68	0,24	5,80	0,28	6,70	0,15	6,63	0,25
PO ₄	4,59	1,68	4,61	2,32	3,61	2,28	4,38	2,26	3,30	1,24
HCO ₃	51,0	12,4	14,21	3,29	3,84	2,52	12,7	2,43	11,3	2,69
Cl	0,85	0,17	0,90	0,20	0,84	0,16	0,79	0,13	0,80	0,11
SO ₄	12,0	3,09	6,16	2,28	9,05	1,17	7,09	0,66	7,12	0,82
NO ₃	2,68	1,21	3,98	0,94	2,30	0,86	3,65	0,45	1,84	0,62
Ca	15,4	4,58	5,81	2,24	2,82	0,87	5,23	0,65	4,15	0,82
Mg	3,79	0,88	0,81	0,55	0,53	0,08	0,63	0,08	0,51	0,10
K	0,60	0,14	0,88	0,22	1,37	0,23	0,96	0,16	1,05	0,19
Na	2,55	0,41	1,73	0,25	1,59	0,47	2,48	0,28	2,38	0,34
Σионов	88,9	18,6	34,5	6,5	22,3	2,59	33,6	3,16	29,1	2,97
Si	6,24	0,91	5,36	0,59	6,68	1,36	6,99	0,61	7,67	1,75

* стандартное отклонение

Таблица 3

Поступление с атмосферными осадками и вынос с речными водами минеральных (ионный сток) и органических веществ (т/км²)

Поступление веществ с атмосферными осадками		Река	Ионный сток	Сток органических веществ
минеральных	органических			
2,59	0,94	Еловый-Пл4	3,40	0,33
		Резервный	6,92	0,64
		Еловый-Устье	3,87	0,32
		Медвежий ключ	17,6	0,46

поступления из атмосферы, что свидетельствует о постоянном накоплении органических веществ в почвенно-биотическом блоке исследуемых бассейнов. Средние (за теплый период года) значения модуля ионного стока для исследуемых рек варьировали от 1,5 до 18 т/км² (табл. 3). Значения модуля ионного стока более 10 т/км² характерны для вод руч. Медвежий ключ. Эти величины близки к региональному значению 14–17 т/км², приведенному в работе Елпатьевского (1993).

Для выявления генезиса формирования ионного состава вод за многолетний, меженный и паводковый периоды был проведен корреляционный анализ и построены простые регрессионные зависимости составляющих ионного и речного стока.

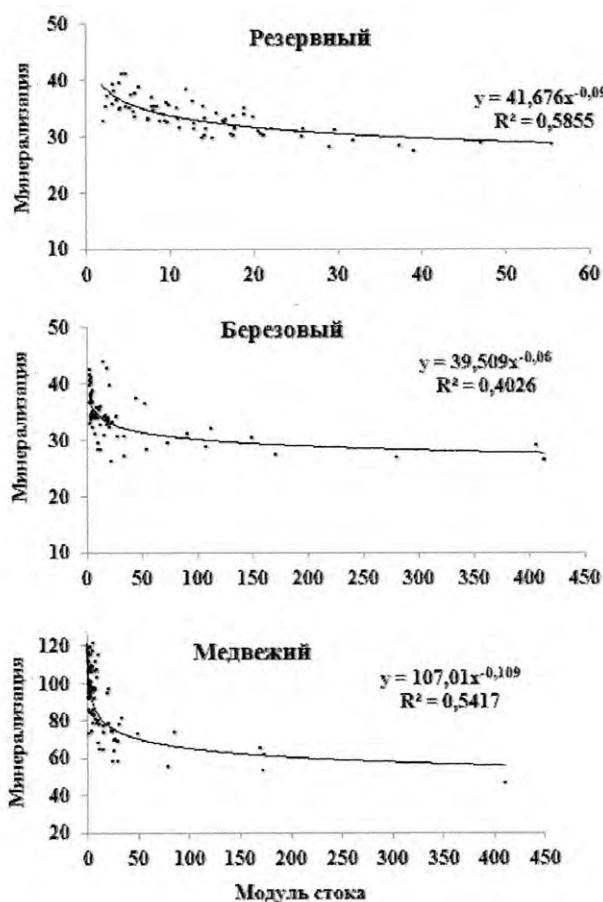


Рис. 1. Зависимость минерализации (мг/л) от модуля речного стока (л/с·км²)

Связь водности с суммой ионов растворенных минеральных веществ явно выражена для ручьев Березовый, Резервный и Медвежий. Связь обратная и имеет вид степенной функции (рис. 1). Отрицательная связь может быть обусловлена тем, что в меженный период увеличивается доля более минерализованных подземных вод. В бассейне ручья Еловый зависимость минерализации от водности проявляется только после повышения расходов воды до величины 40 л/с и более. В данном бассейне для всего наблюдаемого периода установлена линейная зависимость с нитрат-ионами (рис. 2). Подобная прямая регрессия, а также положительная корреляция расхода воды с растворенным органическим углеродом ($R = 0,59$) указывает, вероятнее всего, на смыв органических веществ с водосборной площади в периоды циклональной активности.

Парная корреляция величин общей минерализации рек и концентрации основных анионов и катионов при различной водности в течение теплого сезона показала, что увеличение общей минерализации происходит, в основном, за счет гидрокарбонатов (табл. 4). Лишь во время прохождения высоких паводков в верхней части бассейна руч. Еловый, где в 1960-х годах была проведена экспериментальная вырубка (Жильцов, 2008), связь минерализации с гидрокарбонатами отсутствует. В химическом составе паводковых вод ручья в створе ПЛ4 усиливается роль нитрат-ионов, которые могут поступать с почвенными водами. Тесная корреляция минерализации и нитрат-ионов в периоды высоких паводков установлена также для вод руч. Медвежий ключ. Антропогенные нарушения в его бассейне связаны с промышленными рубками хвойных древостоев и природными пожарами в середине прошлого столетия.

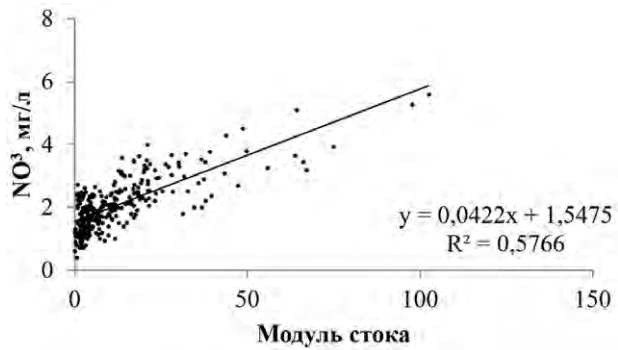


Рис. 2. Зависимость поступления нитратов в воды руч. Еловый от модуля речного стока (л/с·км²)

Таблица 4

Корреляционная связь ($p < 0.05$) минерализации речных вод с макрокомпонентами и pH в различные фазы водного режима в бассейнах Еловый–ПЛ4 (1); Еловый–Устье (2); Резервный (3) и Медвежий ключ (4)

Химические компоненты	Межень				Средний паводок				Высокий паводок			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
pH	0,50			0,25	0,43		0,64		-0,21			0,45
NO ₃	-0,44	0,73	-0,26	-0,24	-0,16	-0,28	-0,21	0,47	0,80	0,23		0,60
HCO ₃	0,78	0,94	0,97	0,87	0,57	0,93	0,92	0,89		0,85	0,85	0,95
SO ₄		-0,48	-0,36	0,32	–	0,30	0,13	0,70		0,55	-0,22	0,71
Cl	0,44	0,30	0,37	0,27	–	0,30	0,59			0,45	-0,20	
Ca	0,43	0,50	0,43	0,69	0,43	0,40	0,34	0,57	0,52	0,36	-0,22	0,85
Mg			0,57	0,73	-0,20	0,45	0,52	0,86	0,55		0,34	0,97
K	0,46	0,23	0,57				0,64	0,24	0,49	-0,50	0,50	-0,24
Na	0,40	0,52	0,39	0,56		0,48	0,30	0,32	0,61	0,48		0,66
Si	0,26		0,25	-0,22	0,42	0,60	0,26		0,30	0,69	0,20	-0,12

Пустые ячейки означают, что коэффициент корреляции меньше //0,20/

Закключение

В целом за многолетний период содержание в поверхностных водах ВУС гидрокарбонатов поддерживается на стабильном уровне, что может являться доказательством устойчивости химического состава природных вод, поступающих в р. Усури с малых залесенных бассейнов с хорошо сохранившимися коренными типами леса.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00541 и программы «Дальний Восток» (грант № 18-6-089).

Литература

- Алекин О.А.** 1970. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат. 444 с.
- Аржанова В.С., Елпатьевский П.В.** 2005. Геохимия, функционирование и динамика горных геосистем Сихотэ-Алиня (юг Дальнего Востока России). Владивосток: Дальнаука. 253 с.
- 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.
- Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:1000000.** 2006. СПб.: Лист К-53.
- Елпатьевский П.В.** 1993. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. М.: Наука. 253 с.
- Жильцов А.С.** 2008. Гидрологическая роль горных хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука. 332 с.
- Кожевникова Н.К.** 2009. Динамика погодно-климатических характеристик и экологические функции малого лесного бассейна // Сибирск. эколог. жур. № 5. С. 693–703.
- Кожевникова Н.К., Дюкарев В.Н.** 2011. Эколого-защитные свойства лесного покрова верхнего пояса гор // Проблемы регион. экологии. № 4. С. 31–38.
- Кожевникова Н.К., Луценко Т.Н., Шамов В.В.** 2017. Факторы формирования химического состава вод малых рек Южного Сихотэ-Алиня // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Вып. 7. Владивосток: Дальнаука. С. 76–84.
- 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.
- Форина Ю.А., Шестеркин В.П.** 2010. Особенности химического состава речных вод восточного макросклона Северного Сихотэ-Алиня // География и природные ресурсы. № 3. С. 81–87.
- Шестеркин В.П., Костомарова И.В.** 2017. Гидрохимия малых рек государственного природного заказника «Тумнинский» // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Вып. 7. Владивосток: Дальнаука. С. 263–266.
- 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.