

СОЛЕВОЙ СОСТАВ ВОД РЕКИ УССУРИ

В.П. Шестеркин¹, В.О. Крутикова^{1,2}

¹Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
ул. Дикопольцева 65, г. Хабаровск, 680000,
e-mail: shesterkin@iver.as.khb.ru

²Институт тектоники и геофизики ДВО РАН,
ул. Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000,
e-mail: nm32697@gmail.ru

Изучена пространственно-временная изменчивость солевого состава вод р. Уссури и ее основных притоков от устья р. Сунгача до с. Казакевичево. Выявленные особенности динамики химического состава вод р. Уссури свидетельствуют об усилении выноса солей из оз. Ханка водами р. Сунгача. Показано, что воды р. Сунгача отличаются более высоким содержанием главных ионов. Установлено, что левобережная часть р. Уссури характеризуется наибольшим содержанием солей. В устье р. Уссури отмечено увеличение содержания хлорид-иона в 1,4 раза в 2013–2016 гг. по сравнению с 2008–2012 гг.

Ключевые слова: река Уссури, озеро Ханка, главные ионы, минерализация.

Река Уссури – крупный правобережный приток Амура. Длина реки составляет 897 км, площадь водосбора – 193 тыс. км², из них в пределах Китая 57 тыс. км². Наиболее крупные притоки – Мулинхэ (длина 577 км, площадь водосбора 18 500 км²), Большая Уссурка (220 км, 29 600 км²), Наолихэ (596 км), Бикин (560 км, 22 300 км²) и Хор (453 км, 24 700 км²). Питание рек в основном дождевое, снеговое составляет 5–20%, подземное – 10–20%. Максимальные расходы наблюдаются в мае и августе, редко – июле или сентябре, наименьшие – феврале–марте [9]. В бассейне р. Уссури расположено оз. Ханка – самый большой водоем на территории Дальнего Востока России (площадь акватории 4070 км², водосбора – 18 400 км²).

Первые исследования химического состава поверхностных вод бассейна Уссури были проведены при содействии «Общества изучения Амурского края» в 1903 г. Они свидетельствовали о больших колебаниях содержания главных ионов, обусловленных несовершенством методов анализа. Так, в южной части оз. Ханка суммарное содержание CaCO₃ и MgCO₃ составляло 32,1 мг/дм³, а в вытекающей из озера р. Сунгача – 124,7 мг/дм³ [6].

В 1946 г. мониторинг химического состава вод р. Уссури у пос. Кировского начал Росгидромет. В 1949–1950 гг. организуются наблюдения на рр. Большой Уссурке (Иман), Бикин и Хор. В 1957–1958 гг. осуществляется мониторинг на р. Сунгача у с. Ново-Михайловки. Менее изучен-

ным остается химический состав воды р. Уссури ниже устья р. Сунгача. Мониторинг качества вод на р. Уссури в 7 км выше с. Казакевичево и в истоке р. Сунгача эпизодически проводился в 2008–2016 гг. совместными усилиями российских и китайских специалистов. Опубликованные ранее материалы [3, 4, 12] в последние годы были дополнены новыми данными, полученными в ходе исследований 2017 г., посвященных 150-летию экспедиции Н.М. Пржевальского по р. Уссури. Результаты этих исследований и стали основой данной публикации. Наибольшее внимание в работе было уделено хлорид-иону, сорбция которого взвешенными веществами и потребление гидробионтами слабо выражена.

Объекты и методы

Гидрохимические исследования на р. Уссури и ее правобережных притоках осуществляли от устья р. Сунгача до с. Казакевичево в июне 2017 г. Схема района исследований дана на рис. 1. Пробы воды отбирали с поверхности на фарватере, в правобережной, средней и левобережной частях русла р. Уссури; на рр. Сунгача, Большой Уссурке, Бикин и Хор – на середине. Аналитические работы осуществляли по общепринятым при гидрохимических работах методам [8]. Химический анализ проб воды на содержание главных ионов (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻) проводили в Центре коллективного пользования «Межрегиональный центр экологического мониторинга гидроузлов» при ИВЭП ДВО РАН. Дополнительно в работе



Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений на р. Уссури

Fig. 1. Scheme of the Ussuri River observation posts location

были использованы опубликованные материалы Росгидромета за 1952–1958 гг. и российско-китайского мониторинга за 2008–2016 гг. Анализ распределения частиц по размерам в образцах 2017 г. был проведен на лазерном дифрактометре SALD-2300 (SHIMADZU, Япония), емкостная ячейка SALD-BC23. Изучение высушенных препаратов [10] проведено в Хабаровском инновационно-аналитическом центре на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMH (TESCAN, Чешская Республика). Для съемки применен детектор обратно

отраженных электронов (BSE-детектор). При анализе элементного состава наиболее репрезентативных участков использовали энерго-дисперсионный спектрометр X-max 80 (Oxford Instruments, Великобритания).

Обсуждение результатов

Речные воды бассейна р. Уссури и ее притоков по химическому составу относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция, первому типу [1], что обусловлено высокой устойчивостью подстилающих пород к выветриванию и муссонным характером климата.

Минерализация воды рек бассейна варьирует в широких пределах. В верхнем течении р. Уссури в мае–июне она изменяется от 34 до 50 мг/дм³, в июле–октябре – 38–48 мг/дм³. Содержание гидрокарбонатного иона в период открытого русла находится в пределах 18–34 мг/дм³. Значительно ниже концентрация хлоридного и сульфатного ионов – 0,4–3,4 и 4,0–10,0 мг/дм³ соответственно. Среди катионов преобладает кальций, содержание которого изменяется от 3,0 до 6,0 мг/дм³. Меньше амплитуда колебаний концентраций ионов натрия и магния – 2,3–3,2 и 1,1–1,6 мг/дм³ соответственно [4].

В средней части течения р. Уссури в районе г. Лесозаводска минерализация воды из-за влияния городских и сельских поселений в условиях низкой водности заметно возрастает. В мае–июне она изменяется от 38 до 42 (40,4 мг/дм³, здесь и далее после пределов варьирования величины в скобках приводятся средние значения) мг/дм³, в июле–октябре – от 52 до 56 (53,9) мг/дм³. В зимнюю межень минерализация достигает 57–72 (64,6) мг/дм³. В анионном составе воды этого участка реки, как и в верхнем течении, доминирует гидрокарбонатный ион (до 74%-экв), за ним следует сульфат-ион (до 38%-экв). Содержание хлорид-иона зимой находится в пределах 0,9–6,5 (3,7) мг/дм³, в период открытого русла – 0,3–1,2 (0,7) мг/дм³ [4]. Среди катионов преобладает кальций (до 44%-экв), близкие значения отмечаются в содержании ионов натрия и магния (до 31 и 27%-экв соответственно).

Сравнение материалов наблюдений за 2017 г. (табл.) и 2008–2012 гг. [4] свидетельствует о небольших различиях в содержании главных ионов. Среди катионов доминирует кальций (55,5%-экв), среди анионов – гидрокарбонатный ион (71,7%-экв). Содержание остальных ионов существенно ниже: магния – 24,2%-экв, натрия – 16,0%-экв, сульфатного и хлоридного ионов – 21,6 и 6,8%-экв соответственно.

В районе слияния рр. Уссури и Сунгача воды последней содержат в три раза больше солей

Химический состав воды р. Уссури и его основных притоков в 2017 г.

Chemical composition of the Ussuri River and its tributaries water in 2017

Показатель, ед. измерения	Уссури, 455 км	Сунгача	Уссури*, 385 км	Бол. Уссурка	Уссури*, 333 км	Уссури*, 255 км	Бикин	Уссури*, 140 км	Хор
Na ⁺ , мг/дм ³	2,0	7,0	3,3	2,0	2,7	3,0	2,5	3,6	1,5
K ⁺ , мг/дм ³	<1,0	3,0	1,2	<1,0	1,0	1,0	<1,0	1,0	<1,0
Ca ²⁺ , мг/дм ³	6,0	15,9	7,6	6,0	6,7	6,9	6,4	6,9	5,1
Mg ²⁺ , мг/дм ³	1,6	5,2	2,2	1,6	2,1	2,1	1,8	2,3	1,6
HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	22	75	30	23	26	26	26	28,3	20
Cl ⁻ , мг/дм ³	1,2	7,7	2,2	0,9	1,4	1,8	0,7	1,9	0,7
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	5,2	9,7	6,8	5,4	5,9	4,3	5,1	7,1	3,4
Минерализация, мг/дм ³	41,0	124,6	55,3	41,8	48,2	47,7	43,5	53,0	34,2

Примечание: * – среднее значение

(рис. 2). Столь значительное различие в минерализации обусловлено тем, что состав вод р. Сунгача формируется оз. Ханка. Водоем относится к испарительно-нейтральному типу, полный водный обмен которого происходит один раз за 10 лет [2]. Испарение составляет 56% или 2,37 км³/год, а сток р. Сунгача, единственной вытекающей из озера реки, – 44% или 1,84 км³/год соответственно. Особенности гидрологического режима оз. Хан-

ка не могут не влиять на химический состав его вод. Так, исследования южной части этого озера летом 1903 г. свидетельствовали о низкой минерализации до 45,4 мг/дм³ и концентрации хлорид-иона до 1,6 мг/дм³ в воде [6]. Более высокая минерализация – 66–110 (90,8) мг/дм³ – отмечалась в мае–октябре 1952–1958 гг., ее значения зимой были выше – до 121–144 мг/дм³. Содержание хлорид-иона в эти годы изменялось от 1,0 до 6,7



Рис. 2. Распределение величины минерализации в воде р. Уссури и его притоков по ширине на участке от устья р. Сунгача до с. Казакевичево в июне 2017 г.

Fig. 2. Width distribution of mineralization value in the waters of the Ussuri River and its tributaries –from the Sungach River to the village of Kazakevichevo, in June 2017

(3,7) мг/дм³. Различия в минеральном составе вод озера в 1903 и 1952–1958 гг. могли быть связаны, с одной стороны, с несовершенством методик анализа, а с другой – с активизацией хозяйственной деятельности на водосборе как на китайской, так и на российской территориях (появлением заводов в гг. Спасске-Дальнем, Арсеньеве и др.). Поэтому минерализация воды р. Сунгача в мае–октябре 1957–1958 гг. находилась в пределах 77–112 (93,4) мг/дм³. Содержание хлорид-иона изменялось от 2,3 до 4,2 (3,2) мг/дм³. Среди анионов доля этого иона варьировала от 5,8 до 12,2 (7,2)%-экв. Доля гидрокарбонатного и сульфатного ионов была выше – до 56–84 и 16–38%-экв соответственно.

Интенсивное развитие мелиорации в российской части бассейна оз. Ханка в 1970-х гг., широкое использование минеральных удобрений, переброска в озеро стока р. Мулинхэ и др. обусловили увеличение поступления растворенных веществ в водоем. Согласно материалам Росгидромета, в воде притоков озера рр. Спасовки и Кулешовки (район г. Спасска-Дальнего) в 1985–2004 гг. содержание хлорид-иона изменялось в пределах 5,0–202 и 12,4–254 мг/дм³, а в 2005–2009 гг. – 5,0–54,6 и 7,1–69,8 мг/дм³ соответственно [5]. Как следствие, наблюдаемые содержания хлорид-иона в воде р. Сунгача в феврале 2008 г. были в два раза выше, чем в 1957–1958 годах и достигали 8,9 мг/дм³, в августе – 7,0 мг/дм³ [7]. Полученные результаты были в 2 раза более высокими и по сравнению с пойменными озерами Нижнего Приамурья [11].

В июне 2017 г. минерализация воды р. Сунгача по сравнению с 1957–1958 гг. была выше в 1,3 раза, содержание хлорид-иона в ней возросло еще больше – в 2,4 раза. В отличие от прошлых лет, доля этого иона достигала 13,3%-экв, в то время как сульфатного иона находилась на уровне 12%-экв.

Согласно данным лазерной дифрактометрии и электронной микроскопии (рис. 3), содержание взвешенных частиц в воде р. Сунгача невелико и не превышает точности гранулометрического анализа. Минеральная часть воды представлена главным образом солями кальция, натрия и магния с преобладанием в их составе карбоната кальция (рис. 3а, в).

Осаждение солей при высушивании происходит в порядке, обратном их растворимости. Образование кальцита в препаратах воды Усури (район впадения р. Сунгача) не характерно. По краям капли высушивания концентрируются лишь тонкодисперсные глинистые минералы группы 2:1 (рис. 3б, г). Существенно меньше в воде Ус-

сури и хлорид-ионов. При высушивании образцов они в присутствии главных катионов образуют лишь единичные микрокристаллы хлорида натрия размером менее 5 нм правильной кубической формы. В то время как в препаратах р. Сунгача диагностируется образование «крупных» размером более 50 нм фрактальных агрегатов хлорида натрия с элементами кубической симметрии. Диатомовые водоросли встречаются единично. Основой диатомового комплекса р. Сунгача являются пеннатные диатомеи. Среди центрических (рис. 3ж, з) по экологии выделяются диатомовые рода *Stephanodiscus* (класс *Coscinodiscophyceae*, семейство *Stephanodiscaceae*), развитие которых стимулируют повышенная минерализация воды, более высокая концентрация хлоридов, сульфатов и соединений биогенных элементов – фосфора, азота и железа (рис. 3з).

Таким образом, анализ многолетней динамики солевого состава вод р. Сунгача свидетельствует об активизации хозяйственной деятельности в бассейне оз. Ханка. Кроме того, учитывая гидрологические особенности водоема (преобладание притока над расходной частью), повышение стока солей в озеро, в том числе из бассейна р. Мулинхэ, можно ожидать дальнейшее увеличение содержания главных ионов в водах оз. Ханка, и как следствие в рр. Сунгача и Усури. Проведение масштабных гидрохимических исследований позволит оценить современное состояние химического состава вод озера и дать прогноз изменения их качества.

Ниже устья р. Сунгача минерализация воды р. Усури возрастает в 1,3 раза (табл.), ее значения по ширине реки выравниваются (рис. 2). Такое относительно равномерное распределение концентраций главных ионов на этом участке р. Усури может быть вызвано поступлением в правобережную часть русла сточных вод г. Лесозаводска и вод р. Мулинхэ через плотину в левобережную часть. Изменения отмечаются и в солевом составе воды: содержание хлоридного иона возрастает на 2,2%-экв, а гидрокарбонатного и сульфатного ионов снижается на 0,8 и 1,4%-экв соответственно.

После впадения правобережных притоков – рр. Большой Усурки, Бикин и Хор – в распределении содержания главных ионов по ширине р. Усури происходят большие изменения, обусловленные их пониженной минерализацией (<42 мг/дм³) [13]. Поэтому наибольшие концентрации главных ионов отмечаются в левобережной части Усури (рис. 2). При этом солевой состав воды р. Усури мало меняется.

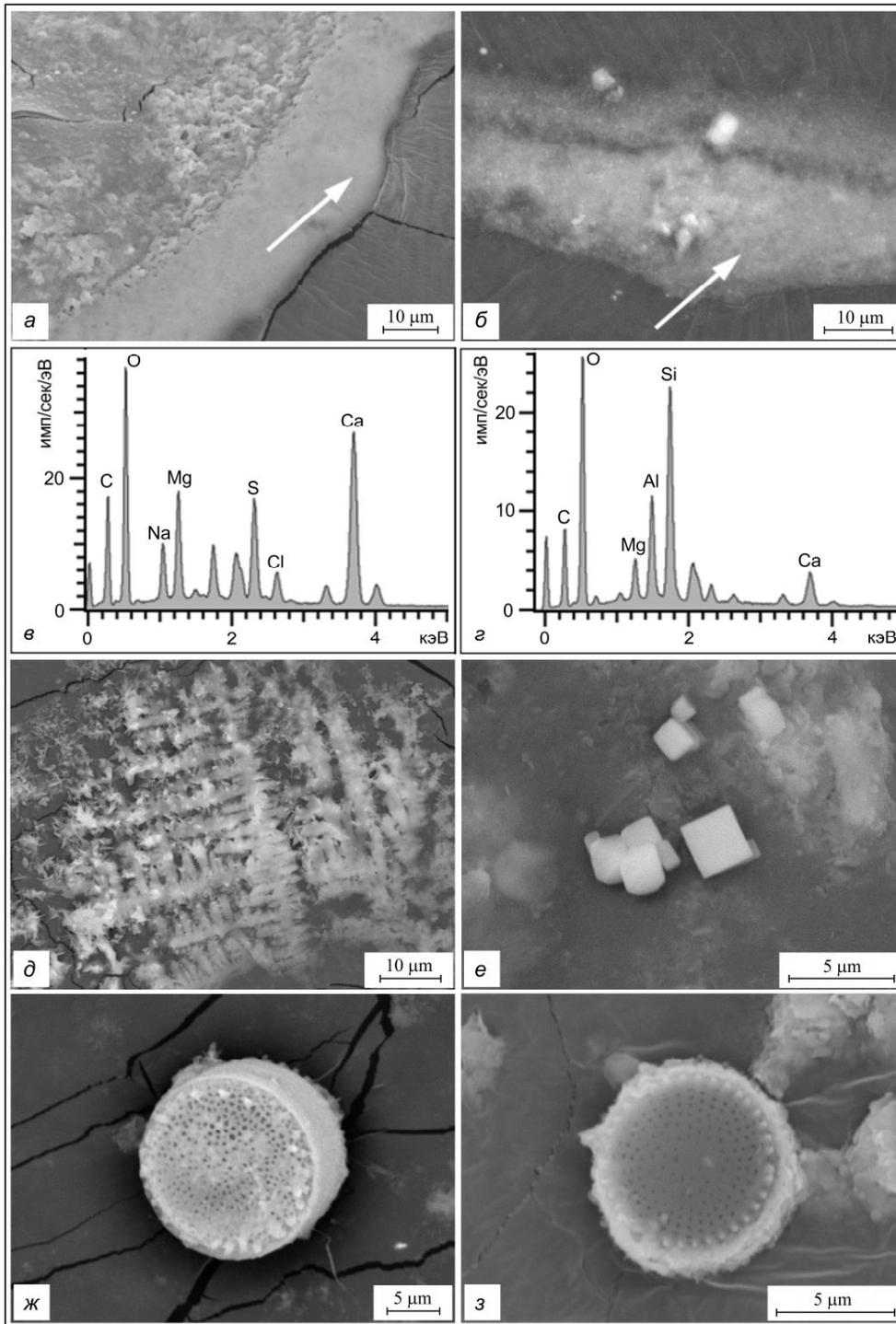


Рис. 3. Микрофотографии препаратов воды рр. Сунгача (а, д, ж, з) и Уссури (б, е), ЭДС-спектры выделенных точек (в, з): край высушенного образца, стрелка – выделения совместной кристаллизации солей с преобладанием карбоната кальция (а, в); край высушенного образца, стрелка – выделения тонкодисперсных глинистых минералов группы 2:1 (б, з); выделения хлорида натрия (д, е); ж, з – центрические диатомеи (РЭМ, BSE-детектор). Остальные пояснения в тексте

Fig. 3. Microphotographs of water samples from the Sungach River (a, d, ж, з) and the Ussuri River (б, е); EDS-spectra of the selected points (в, з): the dried sample edge, the arrow shows the salts joint crystallization, with prevalence of calcium carbonate (a, в); the dried sample edge, the arrow shows crystallites of clay minerals Group 2:1 (б, з); re-precipitation of sodium chloride (д, е); ж, з – centric diatoms (SEM, BSE-detector). Additional notes are given in the text

В районе с. Казакевичево минерализация воды р. Уссури в период открытого русла изменяется в широких пределах – от 34 до 95 (53,3) мг/дм³. Максимальная величина, свидетельствующая о значительном выносе солей с затопленных сельскохозяйственных угодий Китая, отмечалась в левобережной части реки в октябре 2013 г. на спаде исторического паводка (рис. 4). В это же время были зафиксированы наибольшие различия в значениях минерализации по ширине реки. Наименьшие различия в величинах отмечаются в основном при высоких уровнях воды, когда в стоке главной реки доминируют воды правобережных притоков.

Содержание хлорид-иона в период открытого русла также варьирует в больших пределах – 1,2–5,1 (2,2) мг/дм³. По поперечному профилю реки его наибольшие содержания с максимумом в половодье наблюдаются в левобережной части. В содержании остальных ионов сезонные закономерности проявляются не так четко.

По сравнению с 2008–2012 гг. [4] в 2013–2016 гг. отмечается увеличение содержания хлорид-иона в мае–июне в 1,4 раза, в то время как в содержании гидрокарбонатного иона существенные изменения отсутствуют. В зимнюю межень минерализация воды р. Уссури возрастает (рис. 4), изменяясь в узких пределах – 85–122 (107,4) мг/дм³. По сравнению с периодом открытого русла зимой почти в два раза выше концентрация хлорид-иона.

По ширине реки наибольшие величины этих показателей также отмечаются в левобережной части. Выявленные особенности пространственно-временной динамики солевого состава вод р. Уссури свидетельствуют об усилении выноса солей из оз. Ханка водами р. Сунгача.

Выводы

Проведенные исследования выявили существенные изменения солевого состава поверхностных вод бассейна Уссури за период с 1903 по 2017 гг. Особенности пространственно-временной его динамики свидетельствуют об усилении выноса солей из оз. Ханка водами р. Сунгача. Река Сунгача по сравнению с р. Уссури и ее правобережными притоками содержит в 3 раза больше солей, оказывает существенное влияние на распределение концентраций главных ионов по ширине р. Уссури, выделяется повышенным содержанием хлорид-иона. На пограничных участках р. Уссури наибольшие концентрации главных ионов отмечаются в ее левобережной части. Максимальные значения минерализации и их различия по ширине реки были зафиксированы на спаде исторического наводнения в 2013 г. В 2013–2016 гг. в воде р. Уссури по сравнению с 2008–2012 гг. отмечено увеличение содержания хлорид-иона, что свидетельствует об активизации хозяйственной деятельности на водосборе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта № 0294-2018-0002.

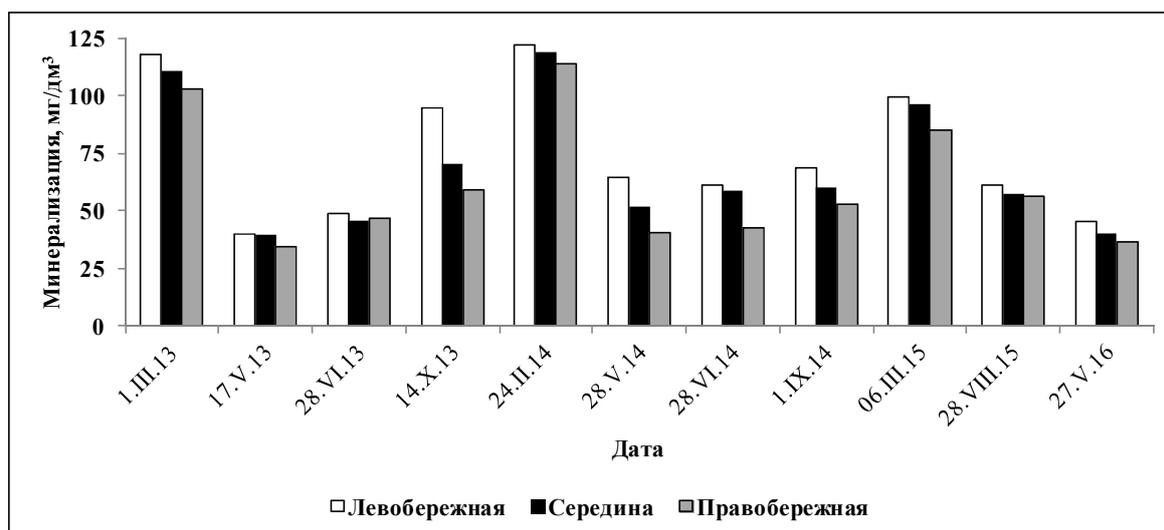


Рис. 4. Распределение величины минерализации в воде р. Уссури по ширине у с. Казакевичево в 2013–2016 гг.

Fig. 4. Distribution of mineralization of the Ussuri River water on width at Kazakevichevo village in 2013–2016

ЛИТЕРАТУРА:

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 413 с.
2. Бакланов П.Я., Качур А.Н., Ананьева Е.Е. Проблемы озера Ханка и его бассейна на рубеже столетий // Трансграничное озеро Ханка: причины повышения уровня воды и экологические угрозы. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 12–25.
3. Зенин А.А., Погадаев Г.И., Цыцарин Г.В. Гидрохимический режим водотоков бассейна реки Усури // Гидрохимические материалы. 1987. Т. 14. С. 3–17.
4. Луценко Т.Н., Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Пространственно-временная динамика химического состава речных вод российской части бассейна р. Усури // Водное хозяйство России. 2013. № 3. С. 65–79.
5. Никаноров А.М., Брызгалов В.А. Реки России. Реки Дальнего Востока (гидрохимия и геоэкология). Ростов-на-Дону: НОК. Ч. IV. 2011. 324 с.
6. Осендовский А.М. Материалы к гидрологии Усурийского края // Записки общества изучения Амурского края. Т. IX. Вып. 2. Владивосток: Типография Н.В. Ремезова, 2004. С. 27–31.
7. Оценка данных совместного Российско-Китайского мониторинга качества вод трансграничных водных объектов в 2008 году. Южно-Сахалинск: Амурское бассейновое водное управление, 2009. 108 с.
8. РД 52.18.595–96 Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды, с изменениями № 1 к РД 52.18.595-96.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР / под ред. М.Г. Васьковского Т. 18. Дальний Восток. Вып. 3. Приморье. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 627 с.
10. Стенина А.С., Генкал С.И., Шестеркин В.П., Ким В.И., Крутикова В.О., Харитоновна Г.В. Состав диатомовых водорослей в ледовых взвесах Среднего Амура // Региональные проблемы. 2018. № 1. С. 3–10.
11. Шестеркин В.П. Гидрохимия пойменных озер Среднеамурской равнины в осенне-зимний период // Геолого-геохимические и биогеохимические исследования на Дальнем Востоке. Владивосток: Дальнаука, 1998. С. 133–136.
12. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Гидрохимическая характеристика р. Усури // Вопросы гидрологии и гидроэкологии Урала: юбилейный сборник научных трудов. Пермь: ПГУ, 2009. С. 73–77.
13. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М., Фокина Ю.А., Таловская В.С., Ри Т.Д. Гидрохимия малых и средних рек юга Хабаровского края // III Дружининские чтения: Комплексные исследования природной среды в бассейне реки Амур: материалы межрег. науч. конф. Хабаровск, 6–9 октября 2009 г., Хабаровск: ДВО РАН, 2009. Кн. 1. С. 129–132.

SALT COMPOSITION OF THE USSURI RIVER WATERS

V.P. Shesterkin, V.O. Krutikova

The salt composition spatiotemporal variability in the Ussuri River and its main tributaries, from the Sungach River mouth to the village of Kazakevichevo, is studied by the authors. They have revealed the features of chemical composition dynamics of the waters showing an increase in carryover of salts from Lake Khanka by the Sungach River waters. The Sungach River waters are characterized by a high content of basic ions, and the Ussuri River left-bank water – by the highest content of salts. The chloride ion amount in the mouth of the Ussuri River in 2013–2016 appears to be 1.4 times higher than that in 2008–2012.

Keywords: Ussuri River, Lake Khanka, main ions, mineralization.