

## ГИДРОХИМИЯ ЗЕЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В МНОГОВОДНЫЕ ГОДЫ

В.П. Шестеркин<sup>1</sup>, П.Н. Терский<sup>2,4</sup>, С.Л. Горин<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,  
ул. Дикопольцева, 56, г. Хабаровск, 68000, Россия. E-mail: shesterkin@ivep.as.khb.ru

<sup>2</sup>Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова,  
Кропоткинский пер., д. 6с1, г. Москва, 119034, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии («ВНИРО»),  
Окружной проезд, 19, г. Москва, 105187, Россия.

<sup>4</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017, Россия

Представлены результаты изучения химического состава вод Зейского водохранилища в многоводные годы (2013, 2021 гг.). Показано, что значительный приток воды в водохранилище в эти годы обусловил в его водах равномерное распределение концентраций растворенных веществ по акватории и глубине в летне-осенний период и крайне неравномерное – зимой. Максимальные значения минерализации, концентрации ионов кальция, магния, гидрокарбонатного и сульфатного ионов, аммонийного азота, органических веществ и растворенного железа установлены зимой на устьевых участках рек Арги и Зeya в результате влияния криогенных процессов и затопления болот Верхне-Зейской равнины. В приплотинной и каньонной частях водоема зимой отмечено отсутствие больших различий в значениях минерализации (28,4–41,9), низкое содержание аммонийного азота ( $< 0,03$  мг N/дм<sup>3</sup>), повышенные значения цветности воды (62–87°), концентрации растворенного железа (0,35–0,74 мг/дм<sup>3</sup>) и органического вещества (10,0–13,3 мг О/дм<sup>3</sup>). Сделано предположение о поступлении больших количеств растворенных веществ в р. Амур зимой вследствие возросших расходов воды Зейской ГЭС.

## HYDROCHEMISTRY OF THE ZEYA RESERVOIR IN HIGH-WATER YEARS

V.P. Shesterkin<sup>1</sup>, P.N. Terskiy<sup>2,4</sup>, S.L. Gorin<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Water and Ecological Problems FEB RAS,  
56 Dikopoltsev St., Khabarovsk 680000, Russia. E-mail: shesterkin@ivep.as.khb.ru

<sup>2</sup>State Oceanographic Institute named after N.N. Zubov, Moscow

<sup>3</sup>Russian Federal Research Institute Of Fisheries and Oceanography (VNIRO),  
19 Okruzhnoy proezd, Moscow, 105187, Russia

<sup>4</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences,  
3, Pyzhevskiy pereulok, Moscow, 119017, Russia

The results of studying the chemical composition of the waters of the Zeya reservoir in high-water years (2013, 2021) are presented. It is shown that a significant inflow of water into the reservoir during these years caused in its waters a uniform distribution of concentrations of dissolved substances in the water area and depth in the summer-autumn period and extremely uneven in winter. The maximum values of mineralization, concentrations of calcium, magnesium, bicarbonate and sulfate ions, ammonium nitrogen, organic substances and dissolved iron were established in winter in the estuarine areas of the Argi and Zeya

regions as a result of the influence of cryogenic processes and flooding of the marshes of the Upper Zey plain. In the dam and canyon parts of the reservoir in winter, there were no large differences in mineralization values (28,4–41,9 mg/dm<sup>3</sup>), low content of ammonium nitrogen (< 0,03 mg N/dm<sup>3</sup>), increased values of water color (62–87°), concentrations of dissolved iron (0,35–0,74 mg/dm<sup>3</sup>) and organic matter (10,0–13,3 mg O/dm<sup>3</sup>). An assumption is made about the receipt of large amounts of dissolved substances in the Amur River in winter due to increased water consumption of the Zeyskaya HPP

Введение

Зейское водохранилище – крупнейшее в бассейне Амура, в Российской Федерации занимает третье место по полному объему. Помимо использования энергетического потенциала реки его появление снизило риск возникновения наводнений ниже г. Зея, способствовало сохранению экологического состояния реки и судоходства ниже плотины. Водохранилище многолетнего регулирования, при НПУ 315,0 м глубина достигает 98 м, полный и полезный объем воды – 68,4 и 32,3 км<sup>3</sup> соответственно, площадь зеркала – 2420 км<sup>2</sup>. Длина водохранилища составляет 225 км, площадь водосбора – 82 500 км<sup>2</sup>. Максимальный уровень (319,53 и 318,67 м соответственно) и приток воды отмечался в 2013 и 2021 гг. Параметры водохранилища в 2012–2022 гг. даны в таблице 1.

Таблица 1

Параметры Зейского водохранилища в 2012–2022 гг.

	Годы										
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Характеристика, км <sup>3</sup> Приток	38,3	47,6	25,7	16,5	39,4	23,2	18,7	26,2	25,2	50,4	25,9
Расход, декабрь–март	7,3	13,6	14,7	7,1	6,5	12,1	8,1	6,9	9,3	9,4	12,9
Расход, апрель–ноябрь	17,7	40,2	20,7	14,0	21,3	16,0	15,9	14,0	16,4	33,8	18,5

В отличие от других водохранилищ Сибири и Дальнего Востока (Вилуйского, Братского, Бурейского и др.) Зейское водохранилище характеризуется длительным периодом наполнения (1975–1985 гг.). Такое продолжительное поступление солей из затопленных почв и растительности оказало большое влияние на формирование химического состава его вод.

Гидрохимические исследования в 1985, 1989, 1994 и 2004 гг. позволили получить первые сведения о химическом составе вод Зейского водохранилища в начале его эксплуатации (Мордовин и др., 1997; Ареева и др., 2010). В многоводном 2013 г. были получены данные о содержании в воде концентраций главных ионов (Шестеркин, 2015) и микроэлементов (Шестеркин и др., 2016; Левшина, Матюшкина, 2021), их распределении по акватории и глубине водохранилища в летне-осенний период. Слабо изученным оставался химический состав вод в многоводные годы.

Материалы и методы

Наблюдения проводили в июле 2013 г., сентябре 2021 и марте 2022 г. Пробы воды отбирали преимущественно с поверхности и придонного слоя, у плотины – дополнительно на глубине 60 м, на устьевых участках рр. Зея и Арги – с поверхности

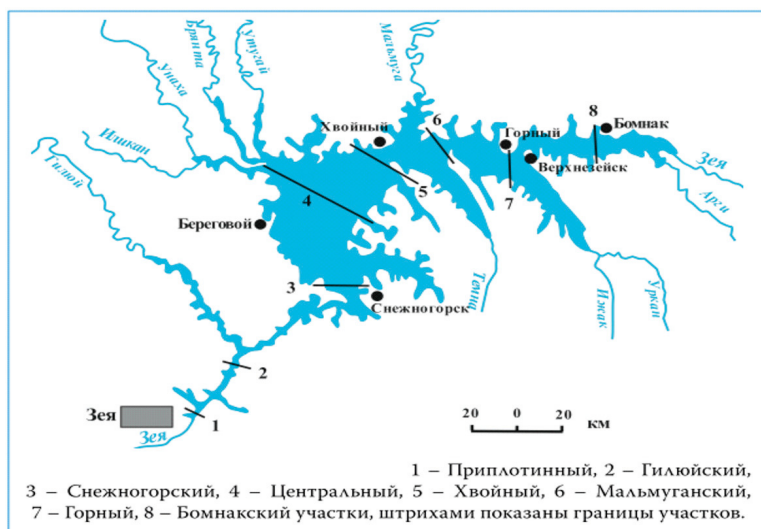


Рис. 1. Схема расположения участков наблюдений

в марте 2022 г. Схема района исследований дана на рисунке 1. В воде определяли содержание главных ионов, биогенных и органических веществ по принятым в гидрохимии методам анализа (Руководящий..., 1996). Анализ проб воды осуществляли в г. Хабаровск в Центре коллективного пользования при ИВЭП ДВО РАН.

### Результаты и обсуждения

По химическому составу воды Зейского водохранилища относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция, I типу (Алекин, 1970), характеризуются нейтральными значениями pH. В 2013 г. содержание главных ионов в воде водохранилища находилось на уровне маловодного 2004 г. (приток составлял 23,5 км<sup>3</sup>), хотя большой приток воды в 2012 г. (табл. 1) и апреле–июне 2013 г. (13,4 км<sup>3</sup>) обусловили выход водохранилища на НПУ уже в середине июля. Содержание ионов натрия и калия, как и в предыдущие годы, не превышало 1,0 и 0,5 мг/дм<sup>3</sup>. По акватории и глубине водохранилища содержание большинства главных ионов распределялось относительно равномерно. Исключение составляли сульфатные ионы, концентрации которых распределялись мозаично: на Приплотинном и Гилюйском участках наибольшие значения наблюдались в придонных слоях, Центральном и Снежногорском участках – в поверхностных горизонтах. Причем в придонных слоях воды Центрального и Снежногорского участков концентрации сульфатов были ниже предела обнаружения (< 1,0 мг/дм<sup>3</sup>).

Среди анионов в составе воды отмечалось хорошо выраженное преобладание гидрокарбонатного иона (39–42 %-экв), значительно меньше содержалось сульфатного (< 12 %-экв) и хлоридного (< 4,0 %-экв) ионов. В катионном составе доминировали ионы кальция (26–29 %-экв). Содержание иона магния находилось в пределах 13–16 %-экв, иона натрия не превышало 7 %-экв.

Минерализация воды основной части водохранилища не превышала 25 мг/дм<sup>3</sup>, т.е. с 1982 г. практически оставалась на прежнем уровне (Шестеркин, 2015). Отсутствовали большие различия и в распределении ее по акватории. Исключение могли составить приустьевые участки малых рек Бол. Гармакан, Широковская и др., дренирующих карбонатные отложения хр. Тукурингра. Концентрации иона кальция

и сульфатного иона на таких участках достигали 19,0 и 14,0 мг/дм<sup>3</sup> соответственно, значение минерализации – 110 мг/дм<sup>3</sup> (Шестеркин, 2015). Повышенными были эти величины и в воде р. Матовая – притоке р. Гилюй (8,2, 9,9 и 53,8 мг/дм<sup>3</sup> соответственно).

В сентябре 2021 г. значение минерализации и содержание главных ионов в воде водоема по сравнению с 2013 г. изменялись в более широких пределах (табл. 2). На Центральном участке минерализация воды находилась в пределах 26,0–27,4 мг/дм<sup>3</sup>, Гилюйском – 25,9–27,8 мг/дм<sup>3</sup>, Бомнакском – 26,8–29,1 мг/дм<sup>3</sup>, т.е. была выше. Более высокой на этих участках была минерализация воды в марте 2022 г.: на Центральном 25,6–31,0 мг/дм, Гилюйском – 28,5–38,5 мг/дм<sup>3</sup>, Бомнакском – 42,0–65,1 мг/дм<sup>3</sup>. Причем, на Центральном и Хвойном участках наибольшее значение минерализации из-за процессов криогенного концентрирования отмечалось в поверхностных слоях воды, а в каньонной части водохранилища из-за присутствия «старых» вод – в придонных горизонтах. Отсутствовали различия в величинах минерализации в марте по глубине лишь на Снежногорском участке (27,7–28,0 мг/дм<sup>3</sup>). Максимальные же значения минерализации (рис. 2), обусловленные выносом растворенных веществ с затопленных болот Верхне-Зейской равнины в условиях значительного падения уровня воды и роста толщины ледяного покрова, отмечались на приустьевых участках рек Зeya (до 147,9 мг/дм<sup>3</sup>) и Арги (223,9 мг/дм<sup>3</sup>). Подледная вода в этих районах характеризовалась на порядок более высоким, чем на остальных участках водохранилища, содержанием сульфатного иона (29,2 мг/дм<sup>3</sup>) и иона кальция (15,2 мг/дм<sup>3</sup>), повышенным содержанием ионов магния (5,3 мг/дм<sup>3</sup>) и калия (2,5 мг/дм<sup>3</sup>). Подобные величины минерализации и концентраций главных ионов могли иметь место и в устьях рек Уркан, Ижак, Темна и др., также в нижнем течении дренирующих затопленные массивы болот Верхне-Зейской равнины, воды которых характеризуются значительным содержанием органических веществ (Лебедев и др., 1977).

Влияние рек Зeya и Арги проявилось зимой и в повышенных значениях минерализации (рис. 2), концентраций ионов кальция (9,3 мг/дм<sup>3</sup>) и магния (2,6 мг/дм<sup>3</sup>), сульфатного иона (5,0 мг/дм<sup>3</sup>) в придонных слоях воды Бомнакского участка.

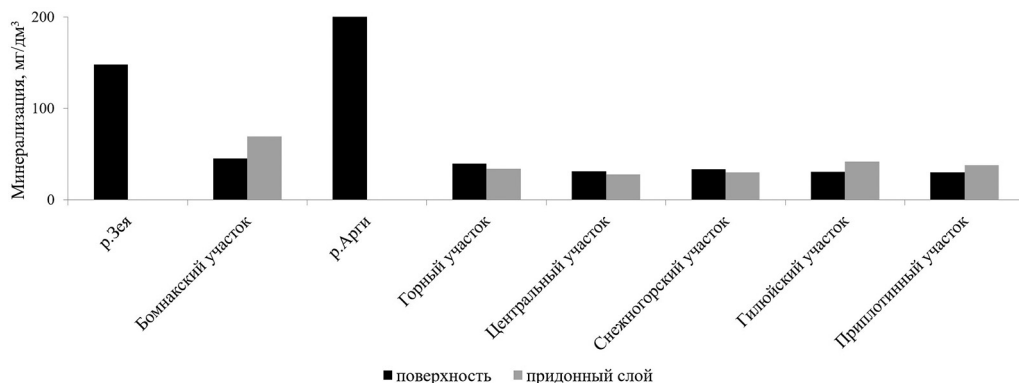
На остальных участках Зейского водохранилища концентрации главных ионов в марте 2022 г. были существенно ниже (рис. 2). Среди анионов в составе воды отмечалось хорошо выраженное преобладание гидрокарбонатного иона (80,6 %-экв). Значительно меньше была концентрация сульфатного (14,0 %-экв) и хлоридного (5,4 %-экв) ионов. В катионном составе отмечалось доминирование иона кальция (58,7 %-экв). Содержание иона магния было менее 20,9 %-экв, натрия не превышало 14,5 %-экв.

Таблица 2

Содержание главных ионов и минерализация в воде Зейского водохранилища

Месяц, год	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	М
Июль, 2013	<u>0,8–1,0</u> 1,0	<u>0,5–0,7</u> 0,6	<u>3,9–4,3</u> 4,1	<u>1,2–1,4</u> 1,3	<u>14,0–15,2</u> 14,8	<u>&lt;1,0–3,3</u> 2,3	<u>0,6–0,8</u> 0,7	<u>23,0–27,0</u> 24,8
Сентябрь, 2021	<u>1,3–2,5</u> 1,7	0,6	<u>3,3–5,2</u> 3,7	<u>0,9–1,5</u> 1,2	<u>16,0–24,0</u> 17,4	<u>&lt;1,0–2,2</u> <1,0	<u>0,3–2,4</u> 0,9	<u>23,8–36,1</u> 26,5
Март, 2022	<u>1,2–1,6</u> 1,3	<u>0,8–1,4</u> 0,9	<u>4,0–5,9</u> 4,7	<u>0,8–1,3</u> 1,0	<u>17,0–23,2</u> 18,5	<u>1,0–3,8</u> 2,5	<u>0,5–0,9</u> 0,7	<u>25,6–69,3</u> 30,4

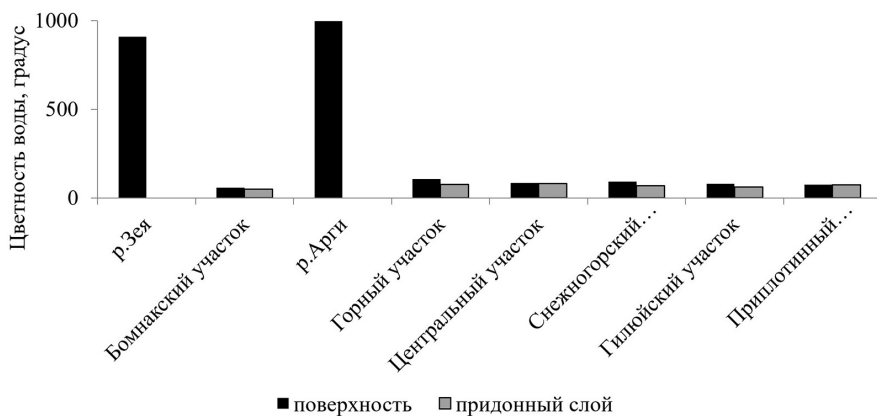
Примечание: над чертой – интервал концентраций; под чертой – среднее значение, мг/дм<sup>3</sup>



**Рис. 2.** Распределение величины минерализации в воде по акватории и глубине Зейского водохранилища в марте 2022 г.

Содержание аммонийного азота и минерального фосфора в марте 2022 г. на всех участках водоема, за исключением устьевых участков рр. Зeya и Арги, незначительное: первого было менее  $0,03 \text{ мг N/дм}^3$ , второго –  $0,004 \text{ мг P/дм}^3$ . В воде устьев рр. Арги и Зeya содержание этих веществ из-за создания анаэробных и близких к ним условий достигало максимальных значений (до  $0,84 \text{ мг N/дм}^3$  и  $0,017 \text{ мг P/дм}^3$ ). В широких пределах изменялось и содержание нитратного азота (от  $< 0,02$  до  $0,12 \text{ мг N/дм}^3$ ) максимальные концентрации которого наблюдались в придонных горизонтах воды Гилуийского и Хвойного участков. Наименьшее содержание отмечалось в воде р. Зeya и придонном слое Бомнакского участка.

Значительная заболоченность бассейна Зейского водохранилища выделяет его среди водохранилищ Дальнего Востока и Сибири повышенным содержанием органического вещества. В марте 2022 г. значения цветности воды (рис. 3) и перманганатной окисляемости (ПО) изменялись в очень больших пределах. Максимальные величины, аномальные для поверхностных вод Дальнего Востока, из-за возникновения анаэробных условий и криогенных процессов отмечались на устьевых участках рр. Арги ( $997^\circ$  и  $34 \text{ мг O/дм}^3$ ) и Зeya ( $908^\circ$  и  $29 \text{ мг O/дм}^3$ ), а наименьшие – в воде р. Зeya выше подпора ( $29^\circ$  и  $4,8 \text{ мг O/дм}^3$ ). На остальных участках водоема цветность воды изменялась от  $62$  до  $107^\circ$ , значения ПО – от  $10$  до  $19,3 \text{ мг O/дм}^3$ , причем наименьшие значения наблюдались в придонных слоях воды Гилуийского участка, а наибольшие – в поверхностных горизонтах воды Хвойного участка.



**Рис. 3.** Распределение цветности воды по акватории и глубине Зейского водохранилища в марте 2022 г.

Заболоченность притоков Зейского водохранилища оказывает значительное влияние и на содержание железа в воде. В начале заполнения водохранилища его содержание за счет образования восстановительной среды, обусловившей поступление закисного железа из донных отложений в воду, в нижних слоях воды достигало  $4,6 \text{ мг/дм}^3$  (Мордовин и др., 1997). В 2013 г. содержание железа не превышало  $0,23 \text{ мг/дм}^3$  (Шестеркин и др., 2016).

Максимальные значения в основном отмечались в придонных слоях воды Центрального участка, причем различия между верхними и нижними слоями воды были незначительными (до  $0,06 \text{ мг/дм}^3$ ). Более существенными вследствие паводка на р. Гиллой были различия в распределении по глубине в районе плотины ГЭС (от  $0,01$  до  $0,10 \text{ мг/дм}^3$ ). В марте 2022 г. содержание растворенного железа в воде всех участков водохранилища, за исключением устьевых рр. Арги и Зея, находилось в пределах  $0,37\text{--}0,71 \text{ мг/дм}^3$ . Причем, на Гиллойском и Центральном участках содержание железа по глубине распределялось относительно равномерно, а на Приплотинном и Хвойном участках наибольшие концентрации отмечались в нижних слоях воды. Максимальное содержание растворенного железа, как и аммонийного азота, наблюдалось на устьевых участках рр. Арги и Зея (до  $28 \text{ мг/дм}^3$ ), причем содержание закисного железа достигало  $0,96 \text{ мг/дм}^3$ .

Аналогичные процессы, вызывающие значительный рост концентраций железа и органических веществ, наблюдаются зимой на затопленных водами Амура заболоченных массивах Приамурья. Так, на болотном массиве у с. Славянка Хабаровского края в конце декабря минерализация воды подо льдом достигала  $186,5 \text{ мг/дм}^3$ , содержание железа –  $5,1 \text{ мг/л}$ , значение ПО –  $199,1 \text{ мг О/дм}^3$  (Иванов, Шестеркин, 1989).

Поступление значительного количества вод Зейского водохранилища (в январе расход в среднем достигал  $1387 \text{ м}^3/\text{с}$ ), содержащих повышенные концентрации минеральных и органических веществ, растворенного железа, как и в начале его эксплуатации (Шестеркин, Шестеркина, 2005), несомненно, повысит содержание этих веществ зимой в воде Амура. Ионный сток р. Зея ниже ГЭС за период с 8 по 14 марта 2022 г. мог составить  $18,6 \text{ тыс.т}$ .

### Заключение

Таким образом, значительный приток воды в Зейское водохранилище в 2021 г. обусловил в зимний период в его водах крайне неравномерное распределение концентраций растворенных веществ по акватории и глубине. Максимальные значения минерализации, концентрации ионов кальция, магния, гидрокарбонатного и сульфатного ионов, железа, органических веществ и аммонийного азота отмечались на устьевых участках рр. Арги и Зея. Приплотинная и каньонная части водоема зимой характеризовались отсутствием больших различий в значениях минерализации, низким содержанием аммонийного азота, повышенными значениями цветности воды, содержанием растворенного железа ( $0,35\text{--}0,74 \text{ мг/дм}^3$ ) и органического вещества ( $10,0\text{--}13,3 \text{ мг О/дм}^3$ ). Сделано предположение о поступлении больших количеств растворенных веществ в Амур зимой в условиях возросших расходов воды Зейской ГЭС.

### Литература

- Алекин О.А. 1970. Основы гидрохимии. Л: Гидрометеиздат. 1970. 413 с.  
Арефина Т.И., Бородицкая Г.В., Бульон В.В., Гаретова Л.А., Каретникова Е.А., Коцюк Д.В., Макаренченко Е.А., Макаренченко М.А., Медведева Л.А., Ри Т.Д., Сиротский С.Е.,

- Таловская В.С., Тесленко В.А., Тиунов М.П., Тиунова Т.М., Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. 2010. Гидроэкологический мониторинг зоны влияния Зейского гидроузла. Хабаровск: ДВО РАН. 354 с.
- Иванов А.В., Шестеркин В.П. 1989. Преобразование химического состава вод при промерзании болот болотного массива у пос. Славянка // Ресурсы болот СССР и пути их использования. С. 149–154.
- Лебедев Ю.М., Каспарова С.Г., Кашин Н.П., Куклина Н.М. 1977. Формирование стока биогенных элементов и органического вещества в верховьях Зеи // Гидрохимия и гидрология юга Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. С. 46–52.
- Левшина С.И., Матюшкина Л.А. 2021. Особенности распределения растворенных форм металлов и металло-гумусовых комплексов в водах Зейского водохранилища // Водные ресурсы. Т. 48. № 6. С. 685–695.
- Мордовин А.М., Петров Е.С., Шестеркин В.П. 1997. Гидроклиматология и гидрохимия Зейского водохранилища. Владивосток, Хабаровск: Дальнаука. 138 с.
- Руководящий документ РД 52.18.595–96. Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды.
- Шестеркин В.П. 2015. Солевой состав вод Зейского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 5. С. 32–42.
- Шестеркин В.П., Сиротский С.Е., Шестеркина Н.М. 2016. Микроэлементы в водах Зейского водохранилища // Жизнь пресных вод. Владивосток: БПИ ДВО РАН. С. 47–53.
- Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. 2005. Влияние Зейского и Бурейского водохранилищ на зимний гидрохимический режим среднего Амура // Науч. основы экол. мониторинга водохранилищ: материалы всерос. науч.-практ. конф. Хабаровск, 28 февр. – 3 марта 2005 г. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН. 2005. С. 63–65. (Дружининские чтения. Вып. 2).