

**ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА
ВЕРХНЕГО ТЕЧЕНИЯ р. УРАЛ
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА**

**Е. А. Шашуловская, С. А. Мосияш, И. Г. Филимонова,
Л. В. Гришина, Е. Г. Кузина**

*Государственный научно-исследовательский институт озерного
и речного рыбного хозяйства им. Л. С. Берга, Саратовское отделение
Россия, 410002, Саратов, Чернышевского, 152
E-mail: shash.elena2010@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.03.17 г.

Формирование гидрохимического режима верхнего течения р. Урал в условиях техногенного регулирования стока. – Шашуловская Е. А., Мосияш С. А., Филимонова И. Г., Гришина Л. В., Кузина Е. Г. – Показано изменение химического состава воды р. Урал (верхнее течение) на участке зарегулирования крупным искусственным водоёмом (Ириклинское водохранилище). Зарегистрировано снижение концентраций основных ионов, органического вещества, биогенных элементов и, особенно, соединений металлов (меди, марганца, железа и алюминия) на участке ниже водохранилища. Отмечено, что возможными причинами изменения рассматриваемых показателей могут быть внутриводоёмные физико-химические процессы, возникающие при низком водообмене на Ириклинском водохранилище. Наибольшая самоочищающая способность зафиксирована для железа и марганца, наименьшая – для меди. Для оценки «здоровья» водной экосистемы предложено использовать показатель устойчивости (усредненный модуль $\left| \overline{r_i} \right|$ коэффициентов корреляции гидрохимических параметров).

Ключевые слова: качество воды, органическое вещество, биогенные элементы, металлы, р. Урал, Ириклинское водохранилище.

Formation of the hydrochemical regime of the upper reaches of the Ural River under conditions of technogenic flow regulation. – Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A., Filimonova I. G., Grishina L. V., and Kuzina E. G. – Changes in the chemical composition of water of the Ural River (upstream) along the section of regulation by a large artificial reservoir (the Iriklin'sky reservoir) are shown. Decreased concentrations of major ions, organics, nutrients, and, especially, compounds of metals (copper, manganese, iron and aluminum) in the area below the reservoir were recorded. It was noted that physicochemical processes inside the Iriklin'sky reservoir occurring at low water exchange could be the possible causes of these changes of the considered parameters. The highest self-cleaning ability was revealed for iron and manganese, whilst the smallest one was for copper. It is offered to use a stability indicator (the average module $\left| \overline{r_i} \right|$ of the correlation coefficients of hydrochemical parameters) for an assessment of the “health” of an aquatic ecosystem.

Key words: water quality, organic substance, biogenic elements, metals, Ural River, Iriklin'sky reservoir.

DOI: 10.18500/1684-7318-2017-4-417-425

ВВЕДЕНИЕ

Река Урал занимает третье место по протяженности среди рек Европы, уступая лишь Волге и Дунаю. Её бассейн расположен на стыке Европы и Азии в густонаселенном регионе с развитой цветной и черной металлургией, добычей и переработкой нефти и газа, сельским хозяйством. Длительное хозяйственное освоение водосборной территории привело к значительной трансформации природной среды. Еще 50 лет назад река занимала одно из ведущих мест в мире по воспроизводству и добыче осетровых видов рыб, однако в настоящее время эти позиции сильно ослаблены (Чибилев и др., 2015).

Верхнее и среднее течение р. Урал находится в лесостепной и степной зонах, нижнее – в районах пустынь и полупустынь. На величину речного стока оказывают влияние не только естественные климатические факторы, но и интенсивная хозяйственная деятельность, связанная с орошением и водопотреблением, последствия которой особенно заметны в маловодные годы.

С целью гарантированного водоснабжения в бассейне Урала было построено около 20 средних и мелких водохранилищ, наиболее крупное из которых – Ириклинское (полный объем 3260 млн м³, площадь при НПУ 260 км², максимальная глубина 34 м), созданное в верхнем течении реки с целью обеспечения водохозяйственных потребностей городов, крупных металлургических комбинатов, развития ирригации и рыбного хозяйства. Низкий водообмен (один раз в два года) способствует аккумуляции в донных отложениях значительного количества загрязняющих веществ и вывода их из биологического круговорота, что отмечается в исследованиях (Павлейчик, Сивохип, 2011, 2013). Однако количественные закономерности переноса загрязняющих веществ в условиях регулирования речного стока р. Урал в силу своей динамичности постоянно нуждаются в уточнении.

Выявление особенностей и механизмов процессов самоочищения и, как следствие, самовосстановления является важным вкладом в развитие теории устойчивого функционирования природных гидроэкосистем. Очевидно, что если водная экосистема функционирует устойчиво, то она способна поддерживать определенный гомеостаз, и качество вод в «здоровой» экосистеме можно считать соответствующим требованиям рыбного хозяйства и, в конечном итоге, сохранения здоровья человека.

В связи с вышеизложенным целью работы являются исследования закономерностей трансформации наиболее важных гидрохимических компонентов р. Урал на участке зарегулирования крупным искусственным водоёмом и оценка «здоровья» такой экосистемы на основе применения некоторых статистических критериев.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для настоящих исследований послужили пробы воды р. Урал, отобранные с поверхностного горизонта на участках выше (с. Кардаилловка) и ниже (с. Колпакское) Ириклинского водохранилища в 2013 – 2016 гг. в сезонном аспекте. Оценку качества воды проводили по показателям кислородного режима, солевого состава, органического вещества, биогенных и токсичных элементов – с использованием общепринятых методик (Реестр методик..., 2015). Также в каждой

точке отбора проб измеряли температуру и прозрачность (по диску Секки). Для оценки динамики показателей рассчитывали их среднесезонные концентрации.

Степень самоочищения воды р. Урал по отношению к некоторым металлам рассчитывали по формуле (Справочник по гидрохимии, 1989):

$$CC = 100(C_n - C_k) / C_n,$$

где CC – степень самоочищения, %; C_n и C_k – концентрации металлов соответственно в начальном и конечном створах водоёма.

Статистическую обработку данных проводили с использованием соответствующих процедур программной среды Microsoft Excel, а также специализированного пакета программы Statgraphics Centurion.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Весной и летом вода в р. Урал, вытекающая из глубоководного Ириклинского водохранилища, прогревалась медленнее в среднем на 3 – 4°C. В осенний период, наоборот, вследствие медленного охлаждения больших водных масс, температура воды на участке ниже водохранилища почти на 6°C выше.

Прозрачность воды колебалась от 0.4 до 1.4 м по диску Секки. Наименьшие значения отмечены в период паводка. В летнюю межень прозрачность увеличивалась и достигала 0.5 – 0.8 м. Максимум прозрачности приходился на осенний период. Такой характер годовой динамики этого показателя воды Урала типичен для равнинных рек со снеговым питанием. Следует отметить, что участки ниже водохранилища характеризовались в 1.6 – 2.8 раза более высокими значениями прозрачности по сравнению с районами, расположенными выше водохранилища.

Вода р. Урал по общепринятой классификации (Алекин, 1970) является среднеминерализованной и относится к гидрокарбонатному классу группы кальция. Реакция среды слабощелочная. Содержание растворенного кислорода находилось в интервале 8.3 – 12.3 мг/дм³.

Формирование режима главных ионов р. Урал зависит от состава питающих его вод. Максимальные величины хлоридов, сульфатов, общей жёсткости регистрировались на участках реки выше Ириклинского водохранилища. В районе с. Колпакское концентрации основных ионов меньше (рис. 1). Низкий водообмен способствует аккумуляции в водохранилище преимущественно вод весеннего паводка, которые имеют пониженную минерализацию.

Содержание органического вещества (ОВ) оценивали по показателям цветности, перманганатной (ПО) и бихроматной (БО) окисляемости.

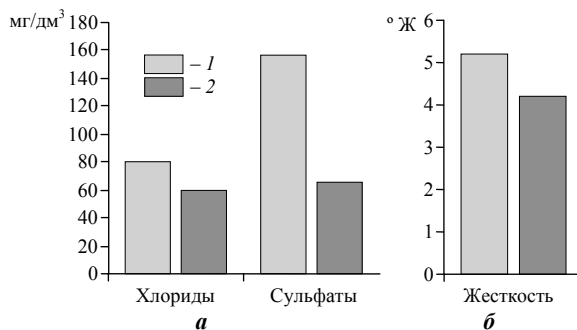


Рис. 1. Содержание хлоридов, сульфатов (а) и жёсткости (б) в воде р. Урал на участках выше (1) и ниже (2) Ириклинского водохранилища

Величины цветности и ПО характеризуют главным образом содержание в воде окрашенных гуминовых веществ аллохтонного происхождения. Однако на участках р. Урал выше водохранилища значения этих показателей не соответствовали друг другу. При относительно высоких величинах цветности значения перманганатной окисляемости малы (рис. 2, а, б). Следует отметить, что цветность воды может быть обусловлена присутствием в воде растворенных коллоидных и взвешенных частиц (Руководство..., 1977), что, видимо, наблюдается в Урале, о чем косвенно свидетельствует низкая прозрачность воды. Кроме того, окраска воды может быть связана с загрязнением неорганическими соединениями железа, марганца, меди как природного, так и техногенного происхождения. Величины цветности на участке реки выше водохранилища характеризовались более высокими значениями (см. рис. 2, а), уменьшаясь от периода паводка (весна) к осени.

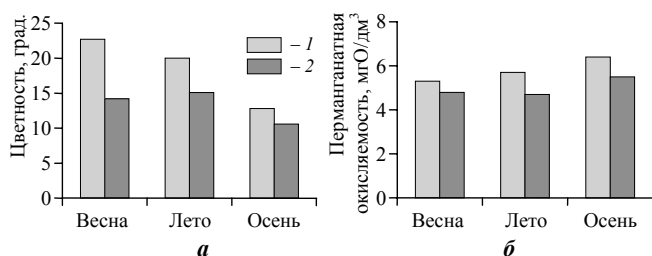


Рис. 2. Сезонная динамика цветности (а) и перманганатной окисляемости (б) на разных участках р. Урал: 1 – участок реки выше водохранилища, 2 – участок реки ниже плотины водохранилища

на участке реки выше водохранилища связаны между собой и изменяются с коэффициентом корреляции 0.68 ($p = 0.045$), в отличие от водохранилищ Нижней Волги, где изменения этих показателей не связаны, так как характеризуют разные группы органических веществ (Шашуловская и др., 2016 б).

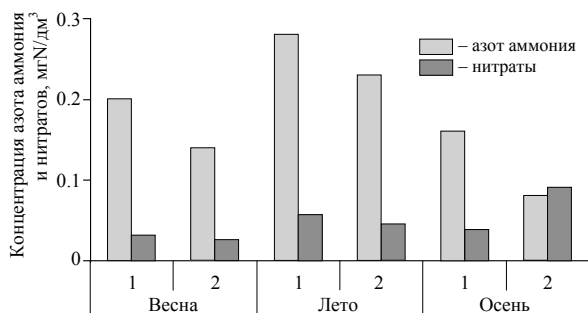


Рис. 3. Сезонная динамика азота аммония и нитратов в воде р. Урал на участках выше (1) и ниже (2) Ириклинского водохранилища

В районе с. Кардаилловка среднесезонное значение БО, характеризующее содержание общего органического вещества, составило 34.4 мгО/дм³, что почти в 1.5 раза выше, чем на участке ниже водохранилища.

Величины перманганатной и бихроматной окисляемости на

Аммонийный азот поступает с поверхностным стоком или образуется в водоёме при минерализации органического вещества. Содержание аммония на участке реки выше водохранилища в 1.2 – 2 раза более высокое, чем в районе с. Колпакское. Максимальные значения отмечены в летний период при трансформации органического вещества (рис. 3). Более быстрый прогрев воды участков реки выше водохранили-

ща в весенне-летний период способствует интенсификации процессов аммонификации, о чем свидетельствует положительная корреляционная зависимость между значениями температуры и концентрациями NH_4^+ ($r = 0.68$ при $p = 0.043$).

Концентрации нитритов в течение периода настоящего исследования характеризовались низкими величинами ($<0.006 - 0.017 \text{ мгN/дм}^3$), что обычно для водоёмов и водотоков с благоприятным кислородным режимом.

Содержание нитратов также было невысоким. В районе с. Кардаилловка концентрации этого соединения колебались в интервале $0.03 - 0.06 \text{ мгN/дм}^3$, на участке с. Колпакское – $0.03 - 0.09 \text{ мгN/дм}^3$ (см. рис. 3).

Сезонная динамика минерального фосфора, второго важнейшего биогенного элемента, на участках выше и ниже водохранилища имела сходный характер. Максимальные концентрации отмечены в летний период. Наибольшие различия между участками по содержанию этого элемента обнаружены весной, причем в районе с. Кардаилловка содержание минерального фосфора было в 2 раза выше, к осени различия нивелируются.

Содержание кремния в водоёмах зависит главным образом от уровня внутри-водоемных процессов и от водообмена с интерстициальными водами, обогащенными кремнием, и в меньшей степени от антропогенного влияния (Йоргенсен, 1985). Средние концентрации кремния на участке выше водохранилища уменьшаются от весны к осени (с 3.6 до 1.5 мг/дм^3), ниже водохранилища максимальные значения 2.0 мг/дм^3 характерны для летнего периода.

Специфика природного фона и промышленное водоотведение в пределах бассейна р. Урал проявляет себя как мощный источник загрязнения, в том числе соединениями металлов (марганец, медь, железо, алюминий).

Формы состояния, миграции и трансформации этих элементов в водных экосистемах зависят от многих абиотических факторов и процессов (рН и жесткости воды; адсорбции, окисления, комплексообразования, гидролиза и др.). Для речных вод Урала с повышенными показателями мутности в большей степени характерны процессы адсорбции металлов на взвешенных частицах. Особенности гидрологического режима и морфометрии Ириклинского водохранилища, а также физико-химические условия способствуют аккумуляции образовавшихся малорастворимых соединений в илах. Кроме того, нельзя не учитывать роль гидробионтов-фильтраторов в процессах самоочищения, которые, пропуская через свои организмы большие количества воды, на определенное время выводят загрязняющие вещества из биологического круговорота.

В сезонном распределении железа на участке реки выше водохранилища прослеживается летний максимум, средние концентрации которого достигают 0.56 мг/дм^3 , что в 5.6 раза выше рыбохозяйственной ПДК (рис. 4). Весной и осенью средние концентрации соответственно в 2.6 – 3.2 раза выше нормативов. Ниже водохранилища во все сезоны содержание железа практически одинаково на уровне ПДК.

Соединения меди и марганца – одни из основных загрязнителей р. Урал. Их поставщиками являются крупные металлургические и горнодобывающие предприятия региона – Магнитогорский металлургический комбинат, Баймакский ме-

деплавильный завод, Бурибаевский горно-обогатительный комбинат (ГОК) и др. Длительно действующими источниками металлов являются отвалы вскрышных пород и шламохранилищ, образующих обширные ареалы загрязнения, поверхностный и подземный сток кислых водоотвальных вод (Павлейчик, Сивохиц, 2013).

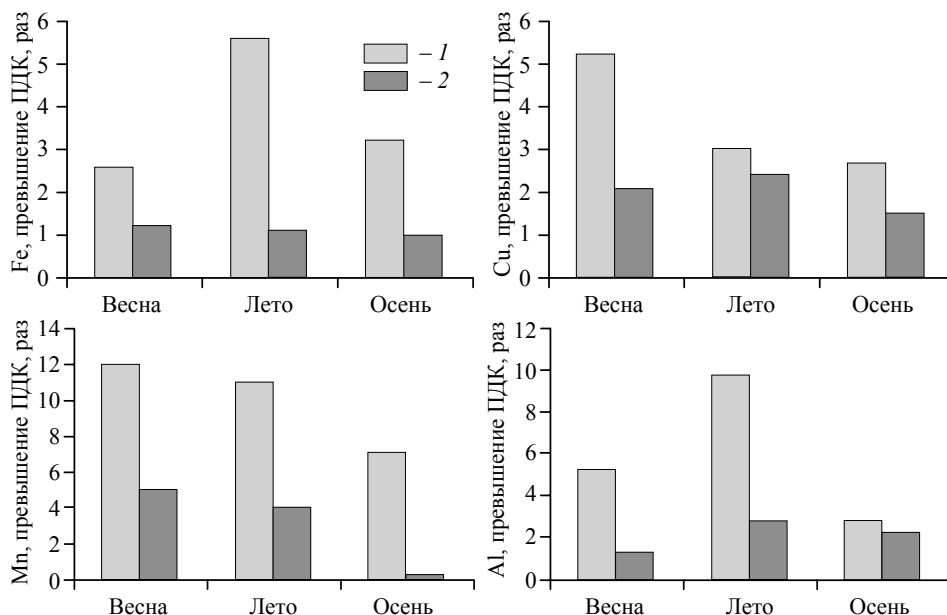


Рис. 4. Сезонная динамика некоторых металлов в воде р. Урал на различных участках: 1 – участок реки выше водохранилища, 2 – участок реки ниже плотины водохранилища

Максимальные концентрации меди и марганца обнаружены весной на участке выше водохранилища в количествах 5.3 и 12 ПДК соответственно (см. рис. 4). Содержание марганца в воде Урала к осени постепенно снижается: до 7 ПДК в районе с. Кардаилловка и почти полностью на участке с. Колпакское. Количества меди в осенний период уменьшаются в 2 (выше водохранилища) и 1.5 (ниже водохранилища) раза.

В сезонной динамике алюминия можно выделить летний максимум (9.8 ПДК) на участке выше водохранилища. Ниже в районе с. Колпакское в конце вегетационного сезона количество этого элемента на уровне 2.1 – 2.7 ПДК (см. рис. 4).

Соединения кадмия в воде не обнаружены (<0.0005 мг/дм³). Концентрации свинца в основном находились ниже предела чувствительности метода (<0.0010 мг/дм³), однако максимальные значения $0.0060 - 0.0082$ мг/дм³ обнаружены именно на участке выше водохранилища.

Для количественной оценки аккумуляющей ёмкости Ириклинского водохранилища в отношении некоторых металлов использовали степень самоочищения.

Максимальную степень самоочищения наблюдали для марганца и железа, наименьшую – для меди (рис. 5). Очевидно, некоторые количества соединений меди привносятся с водосбора рек, впадающих в Ириклинское водохранилище (Шашуловская и др., 2014). Так, расположенный в бассейне р. Таналык Бурибаевский ГОК является основным источником поступления меди в водохранилище.

С точки зрения рыбохозяйственного использования водоёма после прохождения уральской воды через водохранилище отмечено снижение показателей, по которым зарегистрировано превышение ПДК: сульфатов – в 2.4, железа – 3.5, алюминия – 2.9, марганца – 3.3, меди – 1.8 раза.

Для оценки отмеченных нами изменений в содержании гидрохимических компонентов с точки зрения «здоровья экосистемы» была сделана попытка применить показатель устойчивости. Устойчивость является важнейшим качеством любой сложной живой системы (Whittaker, 1975). Математические формализации, гидробиологические и гидрохимические примеры различных определений устойчивости приведены в работе Г. С. Розенберга и Т. Д. Зинченко (2014), которые отмечают, что, несмотря на кажущуюся очевидность понятия «устойчивость», дать ему четкое и однозначное определение оказывается трудной, а иногда и неразрешимой задачей. В этой связи предлагается использовать ряд фрагментарных определений, касающихся лишь некоторых аспектов отдельных сторон данного понятия (Розенберг, 1986).

Так, устойчивость в понимании К. Холлинга (Holling, 1969, 1973) есть способность системы сохранять свои внутренние взаимосвязи при возмущении ее состояния, что соответствует средней силе корреляционных связей. Таким образом, за величину надежности связи в системе принимается усредненный модуль $\overline{|r_i|}$ коэффициентов корреляции ее параметров, который может быть интерпретирован как устойчивость (Михайловский, 1978, 1982; Розенберг, 1986). Подобный подход хорошо зарекомендовал себя на Волжских водохранилищах (Шашуловский, Мосяш, 2010; Шашуловская и др., 2016 а).

В нашем исследовании значение усредненного модуля $\overline{|r_i|}$ коэффициентов корреляции гидрохимических параметров на участке реки выше водохранилища составило 0.29, а на участке ниже водохранилища – 0.38.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что значительное воздействие на процессы миграции и трансформации химических веществ оказы-

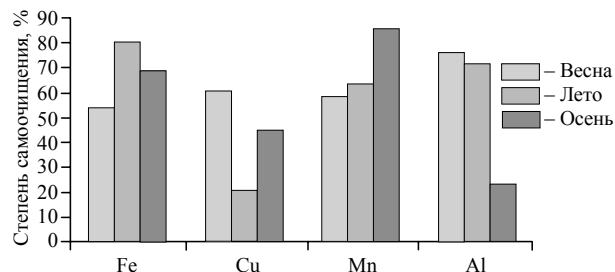


Рис. 5. Степень самоочищения р. Урал на участке сел Кардаилловка – Колпакское

вает Ириклинское водохранилище, являясь своего рода отстойником для различных компонентов внерусового происхождения.

Гидрологические, морфометрические и физико-химические особенности искусственного водоёма способствуют выводу из биологического круговорота значительных количеств поллютантов, что усиливает, очевидно, внутренние связи между гидрохимическими параметрами экосистемы р. Урал, и, в конечном итоге, свидетельствует о ее «оздоровливании» и является благоприятным явлением с точки зрения использования водного объекта в качестве рыбохозяйственного водоёма и источника питьевого водоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алекин О. А.* Основы гидрохимии. Л. : Гидрометеиздат, 1970. 443 с.
- Йоргенсен С. Э.* Управление озерными системами. М. : Агропромиздат, 1985. 159 с.
- Михайловский Г. Е.* Биосфера и человеческое общество // Человек и биосфера. М. : Изд-во МГУ, 1982. Вып. 6. С. 78 – 101.
- Михайловский Г. Е.* Термодинамические аспекты системного подхода к экологии // Человек и биосфера. М. : Изд-во МГУ, 1978. Вып. 2. С. 103 – 123.
- Павлейчик В. М., Сивохин Ж. Т.* Миграция загрязняющих веществ в условиях регулирования стока (на примере верхнего течения реки Урал) // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2011. Т. 13, № 1 – 6. С. 1472 – 1475.
- Павлейчик В. М., Сивохин Ж. Т.* Формирование качества поверхностных вод бассейна верхнего течения реки Урал в условиях техногенной трансформации природной среды // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 5. С. 456 – 467.
- Реестр методик количественного химического анализа и оценки состояния объектов окружающей среды, допущенных для государственного экологического контроля и мониторинга (ПНД Ф). URL: <http://fcao.ru/metodiki-kkha.html> (дата обращения: 01.12.2015).
- Розенберг Г. С.* Устойчивость экосистем и ее математическое описание // Экологические аспекты гомеостаза в биогеоценозе. Уфа : БФАН СССР, 1986. С. 120 – 130.
- Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д.* Устойчивость гидроэкосистем : обзор проблемы // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20, № 4 (61). С. 11 – 23.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л. : Гидрометеиздат, 1977. 541 с.
- Справочник по гидрохимии / под ред. А. М. Никанорова. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 392 с.
- Чибилев А. А., Сивохин Ж. Т., Чибилев А. А., Падалко Ю. А.* Бассейн Урала как трансграничный регион и проблемы его устойчивого развития // Географические проблемы региона Каспийского моря и изучение путей достижения устойчивого развития территорий. М. : Медиа-Пресс, 2015. С. 89 – 98.
- Шашуловская Е. А., Мосияш С. А., Филимонова И. Г., Кузина Е. Г.* Соединения тяжелых металлов в биогидроценозе Ириклинского водохранилища // Рыбохозяйственные водоемы России : материалы междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию ГосНИОРХ. СПб., 2014. С. 1132 – 1139. URL: http://mail.niorh.ru/download.pub/Conference/Fishery_ponds_2014.pdf (дата обращения: 02.02.2017).
- Шашуловская Е. А., Мосияш С. А., Орлов А. А., Фокина Л. Н.* Многолетние изменения качества воды участков Нижней Волги, различающихся по гидрологическому режиму // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2016 а. Т. 18, № 5 – 2. С. 382 – 386.
- Шашуловская Е. А., Мосияш С. А., Филимонова И. Г., Гришина Л. В., Кузина Е. Г.* Гидрохимические основы биологической продуктивности в замыкающих водохранилищах Волжского каскада // Тр. Зоол. ин-та РАН. 2016 б. Т. 320, № 3. С. 367 – 376.

ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВЕРХНЕГО ТЕЧЕНИЯ р. УРАЛ

Шацуловский В. А., Мосияш С. С. Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. М. : Т-во науч. изд. КМК, 2010. 249 с.

Holling C. S. Resilience and stability of ecological systems // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973. Vol. 4. P. 1 – 23.

Holling C. S. Stability in Ecological and Social systems // *Diversity and Stability in Ecological systems* : Brookhaven Symposium in biology. Upton : Brookhaven National Laboratory, 1969. Vol. 22. P. 128 – 141.

Whittaker R. H. Communities and Ecosystems. 2nd ed. New York ; London : MacMillan Publ. Co., Inc., 1975. 387 p.