

УДК 502:574.51

**СОДЕРЖАНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДЕ БЕССТОЧНЫХ ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМОВ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ**<sup>1,2</sup>**Кайгородов Р.В.**<sup>1</sup>*Тобольская комплексная научная станция УрО РАН, Тобольск, e-mail: r-kaigorodov@yandex.ru;*<sup>2</sup>*ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Пермь*

Поверхностные водоемы испытывают существенную антропогенную нагрузку, проявляющуюся не только в накоплении токсичных элементов и ксенобиотиков, но и связанную с процессами эвтрофирования за счет избыточного поступления биогенных элементов. Исследовано накопление биогенных элементов азота (аммонийная, нитратная и нитритная формы) и фосфора (фосфат-ион) в бессточных озерах и старицах реки Тобол, расположенных в Тюменской области. Кроме того, проведен анализ хлорид-ионов, уровня pH и содержания взвешенных веществ в исследуемых водоемах. Для сравнения был проведен анализ гидрохимических показателей в воде прибрежной зоны основного русла р. Тобол. В исследовании использованы стандартные методы ионометрии, комплексонометрии и гравиметрии, применяемые при исследовании водных объектов. Для оценки состояния водоемов по исследуемым показателям использовали ПДК, установленные для водоемов рыбохозяйственного назначения. Установлено превышение ПДК по содержанию нитратного азота и фосфора в старицах р. Тобол, расположенных вблизи с. Нововольбаево на сопредельных с пахотными угодьями территориях. В старицах р. Тобол вблизи с. Ярково и в озере Имбиряй превышение ПДК наблюдалось по показателям pH и взвешенным веществам. Вода озера Чигиркуль, расположенного на удалении от населенных пунктов и сельскохозяйственных предприятий, соответствовала нормативам по всем исследованным показателям. Рассчитаны показатели гидрохимической трансформации исследованных водных объектов. Установлены существенные гидрохимические нарушения в старицах р. Тобол вблизи с. Нововольбаево. Во всех исследованных объектах по содержанию нитратов в прибрежной зоне отмечен высокий уровень гидрохимической трансформации. В воде основного русла р. Тобол содержание биогенных элементов, уровень pH и количество взвешенных веществ не превышали нормативных значений.

**Ключевые слова:** водные экосистемы, вода, бессточные водоемы, биогенные элементы, эвтрофирование**THE CONTENT OF BIOGENIC ELEMENTS IN WATER OF DRAINLESS OPEN RESERVOIRS OF THE TYUMEN REGION**<sup>1,2</sup>**Kaygorodov R.V.**<sup>1</sup>*Tobolsk Complex Scientific Station of the Ural Branch of the RAS, Tobolsk, e-mail: r-kaigorodov@yandex.ru;*<sup>2</sup>*Perm State National Research University, Perm*

Surface reservoirs are experiencing a significant anthropogenic load, manifested not only in the accumulation of toxic elements and xenobiotics, but also associated with the processes of eutrophication due to excessive intake of biogenic elements. The accumulation of biogenic elements of nitrogen (ammonium, nitrate and nitrite forms) and phosphorus (phosphate ion) in the drainless lakes and oxbows of the Tobol River located in the Tyumen region has been studied. In addition, the analysis of chloride ions, the pH level and the content of suspended solids in the studied reservoirs was carried out. For comparison, the analysis of hydrochemical parameters in the water of the coastal zone of the main riverbed of the Tobol River was carried out. The research uses standard methods of ionometry, complexometry and gravimetry used in the study of water bodies. To assess the condition of reservoirs according to the studied indicators, the MPC established for fisheries reservoirs was used. The excess of the MPC in the content of nitrate nitrogen and phosphorus in the old trees of the Tobol river, located near the village of Novolybaevo on territories adjacent to arable lands, was found. In the oxbows of the Tobol river near the village. In Yarkovo and in Lake Ginger, the excess of MPC was observed in terms of pH and suspended solids. The water of Lake Chigirkul, located at a distance from settlements and agricultural enterprises, met the standards for all the studied indicators. The indicators of hydrochemical transformation of the studied water bodies are calculated. Significant hydrochemical disturbances have been established in the oxbows of the Tobol River near the village of Novolybaevo. A high level of hydrochemical transformation was noted in all the studied objects in terms of nitrate content in the coastal zone. In the water of the main riverbed of the river. That is, the content of biogenic elements, the pH level and the amount of suspended substances did not exceed the standard values.

**Keywords:** aquatic ecosystems, water, biogenic elements, eutrophication

Повышенное поступление биогенных элементов, главным образом азота и фосфора, в водоемы является одним из ведущих факторов развития негативных процессов эвтрофирования [1]. Источниками миграции азота и фосфора в поверхностные и грунтовые воды служат предприятия сельского хозяйства, коммунальные и промышленные сточные воды, естественная и антропогенная эрозия почв [2].

Исследования эвтрофирования касаются, как правило, водоемов, используемых в водоснабжении и рыбном хозяйстве. Эвтрофирование естественных водоемов исследовано, на наш взгляд, недостаточно.

Целью исследований являлось изучение накопления минеральных форм азота и фосфора в бессточных открытых водоемах Тюменской области для первичной оценки их чувствительности к эвтрофикации прямым

способом, т.е. по физико-химическим показателям водных объектов.

Содержание аммонийной, нитратной и нитритной форм азота, а также фосфат-ионов и хлоридов подлежит нормированию в природных водоемах, поскольку влияет на качество и безопасность воды, используемой для водоснабжения и в рыбных хозяйствах [3].

Минеральный состав воды выступает одним из ведущих факторов экологического состояния водоемов, определяет видовое разнообразие и соотношения отдельных групп гидробионтов [4, 5]. В процессе эвтрофирования наблюдается снижение видового разнообразия, упрощение трофической системы водоемов, увеличение численности и биомассы цианобактерий [6].

Ведущими абиотическими факторами эвтрофирования водоемов выступают содержание биогенных веществ, кислотность, температурный режим, освещенность водоема [7].

Ряд авторов рассматривает содержание аммонийного, нитратного, нитритного азота, фосфат-ионов и хлоридов в качестве первичных индикаторов геохимической трансформации водоемов [8].

Процессы эвтрофирования могут быть связаны и с естественными процессами поступления биогенных элементов в водоемы. Однако в отличие от естественной эвтрофикации, которая протекает чрезвычайно медленно, антропогенные процессы повышения трофности водоемов, зачастую с изменениями других параметров, например повышение температуры воды или изменение темпов водообмена, характеризуются высокими темпами нарушения химического состава и экологического состояния водоемов [9].

## Материалы и методы исследования

### *Характеристика территории*

Исследуемые нами водные объекты находятся в юго-западной части Тюменской области. Места расположения исследуемых участков представлены в табл. 1.

Почвы, прилегающие к исследуемым водным объектам, относились к следующим типам: прибрежная зона русла и стариц. Тобол (участки № 1–3 и № 6, 7) – аллювиальные дерновые слоистые, прибрежная зона озер (участки № 4 и № 5) – дерново-глеевые.

Донные отложения исследуемых стариц и озер обладали илисто-глинистым гранулометрическим составом. Донные отложения в русле р. Тобол имели тонко-песчано-глинистый гранулометрический состав.

Визуальных признаков эвтрофирования водоемов (зарастание прибрежной зоны, «цветение» воды) в период проведения исследований не отмечено.

### *Методы*

Отбор и подготовка проб воды к анализу. Образцы воды из исследуемых водоемов отбирали в июле 2021 г. в соответствии с требованиями ГОСТ 31861-2012 [10]. На каждом участке воду из водоема отбирали в пятикратной повторности на расстоянии не менее 25 м друг от друга в прибрежной мелководной зоне на удалении 1,0–1,5 м от уреза воды.

Определение ионов аммония, нитрит-ионов, нитрат-ионов, фосфатов и pH проводили на иономере «Экотест-120» с использованием соответствующих ионо-селективных электродов.

Определение хлоридов проводили меркурометрическим методом.

Таблица 1

Географическое расположение исследуемых водных объектов и участков отбора образцов воды

№ объекта	Тип и название водного объекта	Ближайшие населенные пункты	Географические координаты
1	старица р. Тобол	с. Новолыбаево	N 56,292386; E 66,211838
2	старица р. Тобол	с. Новолыбаево	N 56,294294; E 66,232040
3	старица р. Тобол	с. Ярково	N 57,2359; E 67,0256
4	оз. Имбиряй	г. Ялуторовск	N 56,3915; E 66,2150
5	оз. Чигиркуль	с. Новоатъялово	N 57,0050; E 66,3344
6	русло р. Тобол	с. Новолыбаево	N 56,3015; E 66,2303
7	русло р. Тобол	с. Новолыбаево	N 56,2835; E 66,2213

Определение содержания взвешенных веществ в воде проводили гравиметрическим методом.

#### Математическая обработка данных

Математическую обработку результатов проводили в программе Past 3.16 с использованием методов описательной статистики и дисперсионного (показатель наименьшей существенной разности – НСР) анализа на 95% уровне значимости. Достоверность результатов оценивали по критерию Стьюдента.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Данные гидрохимических исследований бессточных водоемов и основного русла р. Тобол представлены в табл. 2.

В прибрежной зоне стариц р. Тобол на участках № 1 и № 2 вблизи с. Новолыбаево установлено превышение ПДК по содержанию нитрат-ионов в 1,4–1,5 раза. В этих же участках содержание фосфатов превышало ПДК в 1,6–1,8 раза. Близкое расположение населенного пункта и пахотных угодий обусловило, вероятно, избыточное поступление и накопление нитратов и фосфатов в исследованных бессточных старицах.

Содержание аммонийного азота и нитрит-ионов в прибрежной мелководной зоне

во всех исследованных водных объектах не превышало ПДК.

Превышение ПДК установлено по уровню pH во всех объектах за исключением оз. Чигиркуль.

В старице р. Тобол на участке № 3 и в оз. Имбиряй (участок № 4) содержание взвешенных веществ превышало ПДК в 1,2 раза. Взвешенные вещества существенным образом воздействуют на помутнение воды и играют важную роль в развитии и угнетении тех или иных групп гидробионтов, например положительно влияя на рост диатомовых водорослей за счет обогащения вод минеральными веществами. По данным некоторых исследований загрязнение водоемов биогенными элементами вызывает изменение в пигментном аппарате прибрежных и прибрежно-водных групп растений [2].

В прибрежной зоне оз. Чигиркуль (участок № 5) и в основном русле р. Тобол (участки № 6 и № 7) исследованные гидрохимические показатели не превышали ПДК.

Для оценки состояния водных объектов, на основании градации предложенной авторами Е.П. Овчаровой, О.В. Кадацкой [8], нами были рассчитаны баллы гидрохимической трансформации водных объектов (табл. 3).

Таблица 2

Гидрохимические показатели исследованных водных объектов

Объект	$\text{NH}_4^+$ , мг/л n = 5	$\text{NO}_3^-$ , мг/л n = 5	$\text{NO}_2^-$ , мг/л n = 5	$\text{PO}_4^{3-}$ , мг/л n = 5	$\text{Cl}^-$ , мг/л n = 5	pH, ед. pH n = 5	Взвешенные вещества, мг/л n = 5
№ 1 старица р. Тобол	0,27 ± 0,07	<b>12,3 ± 0,4</b>	0,010 ± 0,003	<b>0,35 ± 0,09</b>	25,2 ± 0,5	<b>8,7 ± 0,1</b>	0,62 ± 0,11
№ 2 старица р. Тобол	0,30 ± 0,06	<b>13,6 ± 0,4</b>	0,010 ± 0,002	<b>0,32 ± 0,08</b>	35,6 ± 0,7	<b>8,6 ± 0,2</b>	0,53 ± 0,10
№ 3 старица р. Тобол	0,17 ± 0,04	5,2 ± 0,2	0,002 ± 0,001	0,12 ± 0,04	21,2 ± 0,6	<b>8,7 ± 0,2</b>	<b>0,83 ± 0,12</b>
№ 4 оз. Имбиряй	0,16 ± 0,05	4,6 ± 0,2	0,003 ± 0,001	0,10 ± 0,04	15,2 ± 0,4	<b>8,6 ± 0,2</b>	<b>0,86 ± 0,09</b>
№ 5 оз. Чигиркуль	0,07 ± 0,02	2,2 ± 0,1	0,004 ± 0,001	0,04 ± 0,02	10,3 ± 0,5	7,6 ± 0,1	0,29 ± 0,08
№ 6 русло р. Тобол	0,02 ± 0,01	1,1 ± 0,02	0,001 ± 0,001	0,02 ± 0,01	2,4 ± 0,05	6,7 ± 0,3	0,15 ± 0,03
№ 7 русло р. Тобол	0,03 ± 0,01	0,8 ± 0,03	0,002 ± 0,001	0,03 ± 0,01	3,1 ± 0,06	6,6 ± 0,4	0,18 ± 0,04
НСР <sub>05</sub>	0,08	2,1	0,001	0,04	4,0	0,85	0,2
ПДК[3]	0,39	9,1	0,02	0,2	300	6,5–8,5	0,75

Примечание. ± – стандартная ошибка, НСР<sub>05</sub> – показатель наименьшей существенной разности при 5%-ном уровне вероятности.

Таблица 3

Балльная оценка степени гидрохимической трансформации  
исследованных водных объектов

Исследуемый объект	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{Cl}^-$	Сумма баллов
№ 1 старица р. Тобол	2	4	2	3	3	<b>14</b>
№ 2 старица р. Тобол	2	4	2	3	3	<b>14</b>
№ 3 старица р. Тобол	1	4	1	2	2	10
№ 4 оз. Имбиряй	1	4	1	2	2	10
№ 5 оз. Чигиркуль	1	4	1	1	1	8
№ 6 русло р. Тобол	1	3	1	1	1	7
№ 7 русло р. Тобол	1	2	1	1	1	6

Содержание аммонийного азота, нитритов и фосфатов оценивается по следующей балловой системе: 1 балл – содержание менее 0,5 ПДК, 2 балла – содержание 0,5–1 ПДК, 3 балла – содержание 1–2 ПДК, 4 балла – содержание более 2 ПДК. Для оценки содержания нитратов и хлоридов предложены следующая градация: 1 балл – содержание менее 0,05 ПДК, 2 балла – содержание 0,05–0,1 ПДК, 3 балла – содержание 0,1–0,2 ПДК, 4 балла – содержание более 0,2 ПДК. Баллы по содержанию пяти индикаторов (аммонийный, нитритный, нитратный азот, фосфаты и хлориды) суммируются для каждого водного объекта, превышение суммарного балла 10 свидетельствует о превышении ассимиляционного потенциала водной экосистемы, в этом случае происходит нарушение геохимического равновесия в водоеме и [8].

Согласно проведенным расчетам (табл. 3) существенная гидрохимическая трансформация установлена в прибрежной зоне стариц р. Тобол вблизи с. Новолыбаево (участки № 1 и 2). В этих водных объектах суммарный балл трансформации составляет более 10 единиц, что в соответствии с подходами Е.П. Овчаровой, О.В. Кадацкой [8] свидетельствует о превышении порога ассимиляционного потенциала водной экосистемы. В этом случае водный объект требует мероприятий по снижению антропогенной нагрузки.

Все исследованные бессточные водные объекты проявили очень сильную гидрохимическую трансформацию по содержанию нитрат-ионов (4 балла), несмотря на соответствие объектов № 3, 4 и 5 требованиям нормативов (ПДК), предъявляемым к рыбохозяйственным водоемам. Согласно данным некоторых авторов [11] содержание нитратного азота 0,5 мг/л (в 18 раз ниже ПДК) яв-

ляется пороговым для начала процессов эвтрофикации. В исследованных нами водных объектах это пороговое значение превышено в 27–4 раза. Следует отметить, что нормативные требования по качеству воды в водоемах рыбохозяйственного назначения являются более строгими (установлены более низкие ПДК по многим параметрам), чем в водоемах хозяйственно-питьевого назначения.

Продолжение исследований процессов эвтрофирования изучаемых водных объектов видится нам в анализе гидробиологических показателей, главным образом в оценке видового разнообразия и биомассы фитопланктона.

В основном русле р. Тобол гидрохимические показатели свидетельствуют о благоприятном экологическом состоянии в прибрежной мелководной зоне исследованных участков. В отличие от бессточных водоемов в русле рек за счет течения и более интенсивного водообмена негативные процессы избыточного накопления биогенных элементов и чувствительность к эвтрофированию выражены в меньшей степени.

### Заключение

Как показали проведенные исследования, в прибрежной мелководной зоне стариц р. Тобол, расположенных вблизи населенного пункта (с. Новолыбаево) и пахотных полей, наблюдается превышение ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения по содержанию нитратов, фосфатов и по уровню pH. Суммарный балл гидрохимической трансформации [8] в этих объектах превышал отметку 10, что свидетельствует о превышении порога устойчивости водной экосистемы к накоплению биогенных элементов.

В остальных исследуемых бессточных водоемах установлено повышенное нако-



пление нитратов (4 балла) согласно балльной гидрохимической оценке.

Таким образом, прибрежная мелководная часть бессточных водоемов разного типа (старицы и озера) с замедленным водообменом является числительной к процессам эвтрофирования.

В отличие от бессточных водоемов в основном русле р. Тобол на исследуемых участках вблизи населенного пункта содержание биогенных элементов, ионов хлора, показатели pH и количество взвешенных веществ не превышало значений ПДК. Суммарный балл гидрохимической трансформации свидетельствует об отсутствии процессов эвтрофирования.

Период проведения отбора образцов воды пришелся на очень жаркий и засушливый сезон, что могло негативно сказаться на концентрации биогенных веществ в исследуемых водных объектах, особенно в прибрежной мелководной их части.

Проведенные исследования представляют собой первичную оценку экологического состояния бессточных водных объектов в условиях юго-западной части Тюменской области, не используемых человеком в хозяйственных целях. Состояние данных водоемов не представляет прямой угрозы для безопасности водоснабжения и рыбных хозяйств. Изучаемые водоемы могут рассматриваться в качестве модельных водных объектов по исследованию динамики эвтрофирования естественных бессточных пресных водоемов. В дополнение к проведенным гидрохимическим анализам необходимо добавить оценку сезонной динамики более широкого перечня параметров (например, концентрация растворенного кислорода, биологическое поглощение кислорода, содержание общего фосфора и азота, соотношение этих элементов, содержание органического вещества, сульфат-ионов, температура, мутность воды и др.). В комплексе с гидрохимическими исследованиями необходимо также провести гидробиологические исследования структуры и динамики биомассы фитопланктона и других гидробионтов.

*Статья подготовлена при финансовой поддержке ФАНО России в рамках темы «Антропогенная трансформация пойменных экосистем Обь-Иртышского бассейна» (№ НИОКТР АААА-А19-119012190088-0).*

#### Список литературы / References

1. Ашихмина Т.Я., Кутявина Т.И., Домнина Е.А. Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоёмов (литературный обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 6–13.

Ashikhmina T.Ya., Kutyavina T.I., Domnina E.A. Study of the processes of eutrophication of natural and artificially created reservoirs (literary review) // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2014. № 3. P. 6–13.

2. Корнилов А.Л., Петухова Г.А., Коваленко А.И. Ответные биохимические реакции растений из прибрежной зоны водоемов г. Тюмени // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6419> (date of the application: 14.12.2021).

Kornilov A.L., Petukhova G.A., Kovalenko A.I. // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. № 3. [Electronic resource]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6419> (14.12.2021).

3. Перечень рыбохозяйственных нормативов предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999. 304 с.

The list of fishery standards of maximum permissible concentrations (MPC) and approximately safe levels of exposure to harmful substances for water of water bodies of fishery importance. M.: VNIRO, 1999. 304 p.

4. Горохова О.Г. Разнообразие планктонных альгоценозов малых эвтрофных водоёмов ООПТ Самарской области (Россия) // Актуальные проблемы современной альгологии: Тезисы докладов IV Международной конференции. Киев, 2012. С. 82–83.

Gorokhova O.G. Diversity of planktonic algocenoses of small eutrophic reservoirs of protected areas of the Samara region (Russia) // Aktualnye problemy sovremennoy algologii: Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy konferencii. Kiev, 2012. P. 82–83.

5. Макаренкова Н.Н. Изменение фитопланктона озера Воже как показатель его эвтрофирования // Актуальные проблемы биологии и экологии: Материалы докладов XIX Всероссийской молодежной научной конференции. Сыктывкар, 2012. С. 153–155.

Makarenkova N.N. The change in phytoplankton of Lake Vozhe as an indicator of its eutrophication // Aktualnye problemy biologii i ekologii: Materialy lirkfjd XIX Vserossiyskoj molodezhnoy nauchnoy konferencii. Syktyvkar. 2012. P. 153–155.

6. Охлупкин А.Г. Особенности структурной организации фитопланктона водоёмов разного типа бассейна Средней Волги (Россия) // Актуальные проблемы современной альгологии: Тезисы докладов IV Международной конференции. Киев, 2012. С. 228–229.

Okhapkin A.G. Features of the structural organization of phytoplankton of reservoirs of different types of the Middle Volga basin (Russia) // Aktualnye problemy sovremennoy algologii: Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy konferencii. Kiev, 2012. P. 228–229.

7. Романкевич Ю.А. Эколого-геохимическая оценка технологических водоемов в малых городах Беларуси // Природопользование. 2014. Вып. 25. С. 98–108.

Romankevich Yu.A. Ecological and geochemical assessment of technological reservoirs in small towns of Belarus // Prirodopolzovanie. 2014. Vyp. 25. P. 98–108.

8. Овчарова Е.П., Кадацкая О.В. Геоэкологические критерии для целей реабилитации водных объектов на урбанизированных территориях // Природопользование. 2014. Вып. 26. С. 25–30.

Ovcharova E.P., Kadatskaya O.V. Geoecological criteria for the rehabilitation of water bodies in urbanized territories // Prirodopolzovanie. 2014. Vyp. 26. P. 25–30.

9. Цветкова Л.И., Неверово-Дзюпак Е. Как оценить опасный уровень антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 262–270.

Cvetkova L.I., Neverovo-Dizopak E. How to assess the dangerous level of anthropogenic eutrophication of freshwater ecosystems // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2019. № 6 (77). P. 262–270.

10. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартиформ, 2019. 32 с.

GOST 31861-2012. Voda. Odschie trebovaniya k otboru prob. M.: Standartinform, 2019. 32 p.

11. Оксийук О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. Комплексная экологическая классификация поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. № 4. С. 62–72.

Oksiyuk O.P., Zhukinskij V.N., Braginskij L.P. // Gidrobiologicheskij zhurnal. T. 29. № 4. P. 62–72.