

УДК 502.2:504.4.054

*к.т.н. Подлипенская Л. Е.,
Бакуменко Ю. С.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭВТРОФИКАЦИИ И САМООЧИЩЕНИЯ ВОДОЕМОВ

Выполнены исследования процессов загрязнения и самоочищения поверхностных вод на примере Исаковского водохранилища. Выделены параметры, определяющие процесс самоочищения поверхностных вод. Проведен анализ динамики изменения концентрации растворенного кислорода в воде и коэффициента самоочищения водоема.

Ключевые слова: Исаковское водохранилище, самоочищение, эвтрофикация, растворенный кислород.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Интенсивное развитие промышленности и сельского хозяйства в настоящее время привело к острому дефициту водных ресурсов на суше. Создание искусственных водоемов — типичный путь решения водных проблем. Наиболее широкое развитие строительство плотин и водохранилищ при них получило в 1930–1950-х годах в вододефицитных районах во всем мире. В первые 20–30 лет строительство водохранилищ оказалось спасательным кругом для развития и расширения масштабов промышленных регионов. Искусственные водоемы со временем расширили список направлений использования, в ряде случаев они приобрели рекреационное значение.

В настоящее время водохранилища испытывают сильнейшую антропогенную нагрузку, которая связана прежде всего с постоянным поступлением загрязняющих веществ в водоем, значительным колебанием нормального подпорного уровня при эксплуатации, замедленным водообменом, тепловым загрязнением и др.

Являясь водоемами промышленного и сельскохозяйственного использования, водохранилища впоследствии приобрели многие свойства природных объектов, и поэтому относятся к природно-антропогенным объектам. Анализ состояния водохранилищ должен включать их оценку как с позиций народно-

хозяйственного использования, так и с учетом экологических характеристик объекта.

Луганская Народная Республика по запасам водных ресурсов является недостаточно обеспеченной, что связано как с природными, так и с антропогенными факторами. Проблема дефицита пресных вод в Республике сопровождается неудовлетворительным экологическим состоянием ряда водотоков и водоемов.

В современных условиях процессы развития и преобразования водных экосистем протекают значительно быстрее, чем раньше, поскольку они обусловлены, в основном, не естественными факторами, действующими в масштабе геологического времени, а антропогенными. К числу глобальных процессов, резкое возрастание скорости которых отмечено в последние десятилетия, можно отнести процесс антропогенного эвтрофирования [1]. Естественно, что это не единственная проблема для водных экосистем, но именно ее называют доминирующей в современных условиях [2].

Принимаемые меры по восстановлению нарушенных водных экосистем должны проводиться с учетом степени их деградации, оценкой процессов эвтрофикации и самоочищения водоемов. В связи с этим направление, связанное с изучением экологического состояния водных объектов ЛНР, возможностью их самоочищения и самовосстановления, является актуальным.

Постановка задачи. Поступающие в водоем загрязнения вызывают в нем нарушение естественного равновесия. Способность водоема противостоять этому нарушению, освободиться от вносимых загрязнений составляет сущность процесса самоочищения.

Процессы самоочищения вод весьма разнообразны и зависят от конкретных условий, в которых пребывает водный объект, но определяющим для них является характер биологического и физико-химического разложения органических загрязнителей в воде.

Цель исследования — изучение процессов биологического и химического самоочищения водоемов на примере Исаковского водохранилища.

Объектом исследования является Исаковское водохранилище — самое крупное водохранилище Луганской Народной Республики, подвергающееся на всем протяжении своего существования длительному антропогенному воздействию.

Предмет исследования — особенности и закономерности протекания процессов самоочищения водохранилища.

Задачи исследования:

- проанализировать факторы, приводящие к усилению эвтрофикационных процессов в Исаковском водохранилище;
- определить показатели, характеризующие процесс самоочищения водоема, и исследовать динамику их изменения.

Методика. Для оценки поступающих в Исаковское водохранилище загрязняющих веществ и определения способности водоема к самовосстановлению использовались методы гидрохимического, гидробиологического анализа. Обработка и анализ данных производились с помощью методов математической статистики.

Изложение материала и его результаты. На территории ЛНР предприятия практически всех отраслей промышленности сбрасывают в водные объекты загрязняющие вещества. Реки, озера, водохранилища и пруды наряду с подземными источниками используются для промышлен-

ного и коммунального водоснабжения, орошения и рыборазведения.

По данным Министерства природных ресурсов и экологической безопасности ЛНР, на территории Республики расположено 26 водохранилищ, 442 пруда, 2 озера и 11 обводненных карьеров [3]. Общая площадь водного зеркала составляет 3490,53 га.

По площади зеркала 27,28 % и соответственно 952 га занято в Антрацитовском районе, 18,18 % и 634,7 га — в Свердловском районе, 17,19 % и 600,19 га — в Лутугинском районе, на 4 месте — Перевальский район (15,55 % и 542,82 га).

Самым большим водоемом Луганской Народной Республики является Исаковское водохранилище, расположенное на территории Перевальского района. Водные объекты региона подвергаются значительной техногенной нагрузке в результате сброса промышленных, сельскохозяйственных, коммунальных сточных вод, шахтных вод и др. Выбросы вредных веществ, объем которых значителен в районе исследования, также загрязняют водные объекты путем депонирования их на водных поверхностях, подземного и поверхностного стока с загрязненных территорий.

Наиболее значительными в регионе по уровню загрязнения окружающей среды являются металлургические и коксохимические предприятия, в число которых входит Филиал № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (бывший ПАО «Алчевский металлургический комбинат» и ПАО «Алчевсккокс»), Филиал № 13 ЗАО «Внешторгсервис» (бывший ПАО «Стахановский завод ферросплавов») и ПАО «Стахановский завод технического углерода».

Источниками загрязнения природной среды Перевальского района также являются отвалы горных пород шахт как эксплуатируемых сегодня, так и закрытых, сельскохозяйственная деятельность и автомобильный транспорт.

Своих водных ресурсов в регионе не хватает, в то время как для успешного функционирования предприятий промыш-

ленности и сельского хозяйства необходимы значительные объемы воды удовлетворительного качества. Основным источником водных ресурсов является Исаковское водохранилище. Вода водохранилища используется как техническая для охлаждения, разбавления стоков, как сырье для производства питьевой воды на СП «Аква-сервис», а также для хозяйственных нужд жителей окружающих населенных пунктов и дачных обществ.

Основные сведения об объекте. Исаковское водохранилище создано в 1953 году на р. Белая. Расположено в 10 км от Алчевска. Расстояние от устья

реки до гидроузла 23 км. Длина водохранилища 11,6 км, средняя глубина 7,18 м, максимальная 18 м [4].

Исаковское водохранилище расположено между поселками городского типа Бугаевка, Михайловка и селами Степановка, Троицкое, Малооконстантиновка (рис. 1).

По берегам водохранилища находятся следующие дачные общества: Химик-1, Химик-2, Электрон, Родник, Звездочка, Автомобилист, Наука, Metallург-1, Metallург-2, Metallург-3, Metallург-4, Алые паруса, Ремонтник. Полив дачных участков осуществляется преимущественно водой водохранилища.

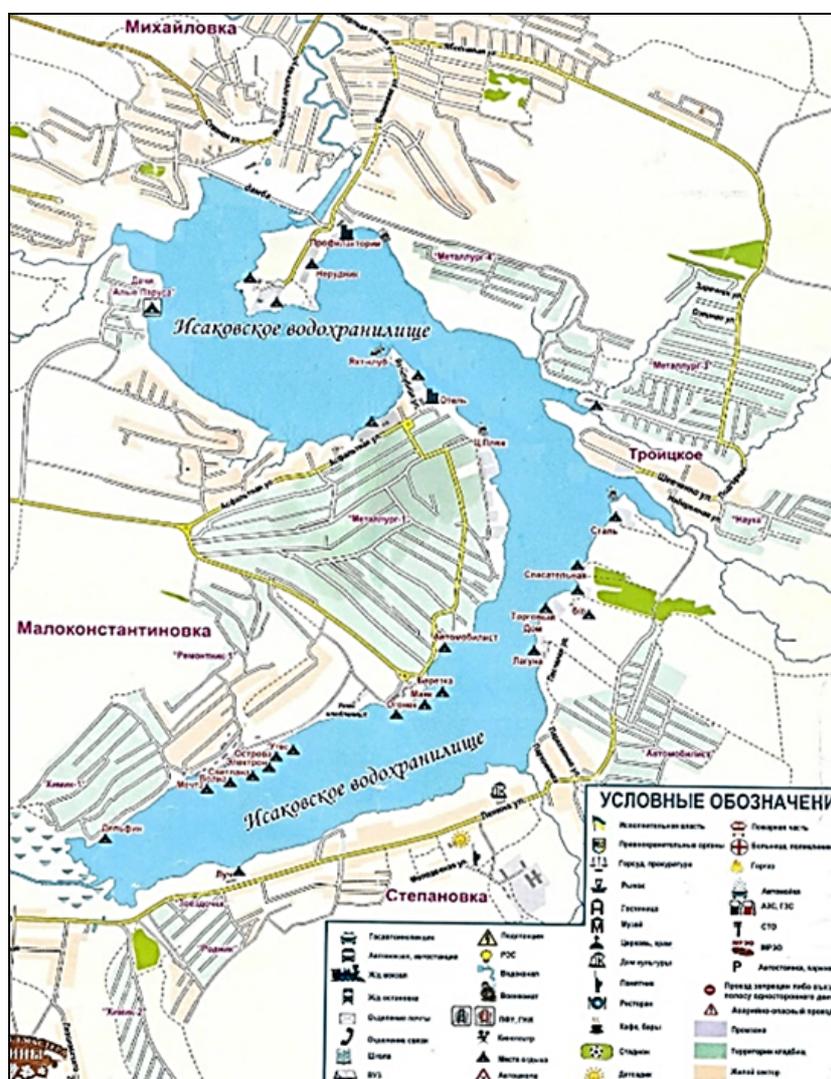


Рисунок 1 Карта Исаковского водохранилища

На карте также отмечены места отдыха населения: Профилакторий, Нерудник, Сталь, Спасательная, Торговый дом, Лагуна, Луч, Дельфин, Мечта, Волна, Светлана, Электрон, Острова, Утес, Огонек, Маяк, Березка, Автомобилист, Бамбук (центральный пляж), Росинка, Отель, Яхт-клуб, Алые паруса (рис. 1).

В целом 23 организованных и неорганизованных места отдыха на берегу — и это при условии, что вода по санитарным нормам не подходит для купания. В каталоге водоемов [3] назначение Исаковского водохранилища описывается как источник технического водоснабжения и место рекреации для населения (с 2019 г.).

Антропогенное воздействие. Исаковское водохранилище подвергается мощному антропогенному воздействию по следующим направлениям: изъятие воды из водохранилища (для промышленных нужд и дачных поливов); сброс неочищенных промышленных, шахтных и канализационных вод, смыв почвы с сельхозугодий, несанкционированные свалки по берегам.

Кроме внешних источников загрязнений, в экосистеме водного объекта немалую роль играют внутренние процессы. Прежде всего, это самозагрязнение водоема в результате его эвтрофикации.

Эвтрофикацией называется процесс ухудшения качества воды из-за избыточного поступления в водоем так называемых «биогенных элементов», в первую очередь соединений азота и фосфора. Являясь нормальным природным процессом, связанным с постоянным смывом в водоемы биогенных элементов с территории водосборного бассейна, эвтрофикация в водоемах с высокой антропогенной нагрузкой увеличилась многократно из-за сброса в них коммунально-бытовых стоков, стоков с животноводческих ферм, а также из-за смыва избыточно внесенных удобрений с полей.

На рисунке 2 представлен механизм развития самозагрязнения в водной среде.

Ухудшение качества воды в водоеме вызывается чрезмерным количеством органических веществ, которые появляются при массовом развитии фитопланктона. Идет накопление биомассы водорослей и продуктов деструкции биоты водоема.

Источником самозагрязнения водохранилища биоэлементами являются и донные отложения, что также снижает интенсивность процессов самоочищения. Разложение биомассы в таких случаях приводит к увеличению содержания в воде органических и минеральных, в том числе токсических веществ, существенным образом ухудшающих качество воды. Среди токсических веществ обнаруживаются полипептиды, фенолы, индолы, скатолы, сероводород и др.

Для анализа процесса эвтрофикации водоема обычно используют гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические характеристики, измерения которых выполняются на станциях постоянного мониторинга водного объекта. Основными показателями являются температура воды, прозрачность, мутность, pH, концентрация фосфатов, азотосодержащих веществ и растворенного кислорода. Показатели взаимосвязаны, изменения одних из них приводят к увеличению или уменьшению других согласно схеме, представленной на рисунке 3 (стрелочка вверх означает увеличение показателя, вниз — уменьшение).

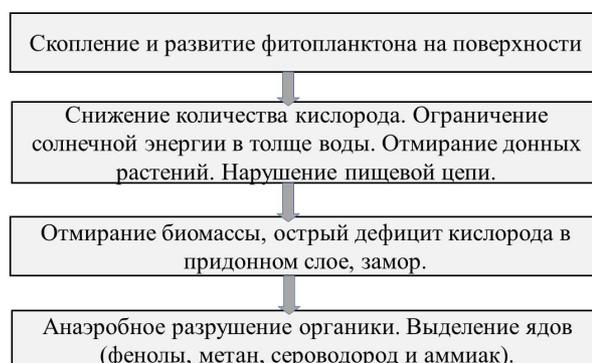


Рисунок 2 Механизм развития самозагрязнения водоема

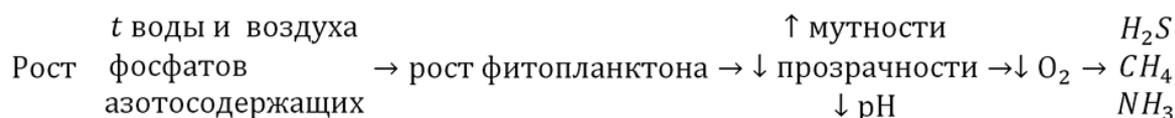


Рисунок 3 Схема взаимосвязи показателей эвтрофикации водоема

Практические исследования. Для изучения процессов антропогенного загрязнения и самоочищения и выявления тенденций, закономерностей, взаимосвязей показателей качества воды в условиях Исаковского водохранилища использовались результаты экологического мониторинга водоема за период времени 2013–2017 гг. Анализировались следующие характеристики поверхностных вод: температура, прозрачность и мутность, водородный показатель, концентрации растворенного кислорода, ионов аммония, нитратов, нитритов, ортофосфатов, БПК₅, и численность фитопланктона.

Характер, интенсивность и давность загрязнения водного объекта оценивались с помощью шкалы, представленной в таблице 1.

По данным мониторинга поверхностных вод с учетом характеристик таблицы 1 можно сделать выводы о том, что в Исаковском водохранилище складывается ситуация, благоприятная для появления обильного роста фитопланктона, и в результате его отмирания на дне водоема создаются анаэробные условия, способствующие образованию сероводородных «карманов».

Результаты корреляционного анализа, позволяющие установить значимые связи

между рассматриваемыми показателями, приведены в таблице 2. Проверка значимости коэффициентов парной корреляции проводилась с помощью критерия Стьюдента. Жирным шрифтом в таблице 2 выделены значимые связи между показателями ($p = 0,05$).

Анализ корреляционной матрицы (табл. 2) позволяет установить следующие закономерности в изменении значений показателей качества воды Исаковского водохранилища:

– температура воды (X1) является определяющим климатическим фактором, в существенной степени влияющим на качество воды (X2, X3, X5, X6, X7, X11), причем показатели, характеризующие негативные изменения в экологическом состоянии водного объекта, с ростом температуры увеличиваются, а показатели с позитивным эффектом — уменьшаются;

– рост фитопланктона (X11) наблюдается с повышением температуры воды и увеличением концентрации ионов аммония (X6), сопровождается увеличением мутности (X3) и уменьшением концентрации растворенного кислорода (X5) в воде.

Таблица 1

Характеристики загрязненности водоемов по наличию примесей в воде [5]

Наличие в воде примесей	Характеристика загрязненности воды
NH_3 , NH_4^+ , Cl^- , $(NH_4)_2SO_4$	Загрязнение свежее
NH_4^+ , Cl^- , NO_2^- , NO_3^-	Загрязнение началось довольно давно и продолжается. Идет процесс разложения органических веществ
Cl^- , NO_2^- , NO_3^-	Свежего поступления загрязняющих веществ нет, идет процесс минерализации органических веществ
NO_2^- , NO_3^-	С момента загрязнения прошел большой срок, произошла полная минерализация органических веществ

Таблица 2

Корреляционная матрица показателей качества воды Исаковского водохранилища за 2014 год

Показатели	Месяц года	Температура, °С	Прозрачность, см	Мутность, мг/дм ³	Водородный показатель, рН	Растворенный кислород, мгО ₂ /дм ³	Аммоний-ионы, мг/дм ³	Нитрат-ионы, мг/дм ³	Нитрит-ионы, мг/дм ³	Ортофосфаты, мг/дм ³	БПК ₅	Численность фитопланктона, кл. в см ³
	t	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
t	1											
X1	0,37	1										
X2	0,01	-0,65	1									
X3	0,20	0,77	-0,58	1								
X4	-0,14	-0,47	0,54	-0,36	1							
X5	-0,24	-0,85	0,65	-0,77	0,80	1						
X6	0,33	0,59	-0,21	0,79	-0,49	-0,73	1					
X7	-0,77	-0,70	0,32	-0,46	0,46	0,67	-0,49	1				
X8	0,17	-0,08	-0,23	0,09	-0,26	0,03	0,12	-0,05	1			
X9	0,05	0,14	-0,18	0,11	0,20	0,02	0,00	-0,02	-0,25	1		
X10	-0,31	0,17	-0,39	0,34	-0,43	-0,41	0,10	0,11	-0,13	-0,07	1	
X11	0,66	0,71	-0,44	0,65	-0,40	-0,63	0,65	-0,82	0,36	0,09	-0,13	1

Необходимо отметить, что растворенный кислород играет особую роль в формировании механизма самоочищения водоема, его концентрация существенно меняется в течение года в результате сложных биохимических процессов, связанных с разложением органических соединений в воде.

Самоочищение водоема. По ГОСТ 27065-86 «Качество вод» термин самоочищение понимается как «совокупность природных процессов, направленных на восстановление экологического благополучия водного объекта».

Процесс самоочищения замедляется или вовсе прекращается при постоянном сильном загрязнении водоемов промышленными или коммунально-бытовыми стоками, что вызывает скопление гниющего ила, появление токсических химических соединений, развитие полисапробной флоры и массовый мор рыбы. Быстрота самоочищения зависит от многоводности, скорости течения воды и ветра, способствующих перемешиванию воды в водоеме,

а также ряда техногенных факторов. Представляет интерес сопоставление физических, химических, биологических и бактериологических показателей водохранилищ, подвергающихся интенсивной эксплуатации и значительному антропогенному воздействию.

В процессе самоочищения поступившие загрязнения разбавляются водой водоема, взвешенные в воде вещества постепенно осаждаются на дно, а органические вещества подвергаются окислению за счет растворенного в воде кислорода. При этом аэробные процессы происходят преимущественно в верхних слоях водоема, а анаэробные — на дне водоема. В результате органические вещества, распадаясь на менее сложные, постепенно минерализуются. Исаковское водохранилище, согласно исходным данным и таблицам 1 и 2, уже давно загрязняется, причем этот процесс происходит независимо от сезонов года.

Интенсивность процессов самоочищения зависит от концентрации растворенно-

го в воде кислорода. Чем его больше, тем процесс самоочищения идет быстрее. Максимальная насыщающая концентрация кислорода в холодной воде составляет около 9 мг/дм^3 , при дополнительной аэрации может повышаться в 1,5–2,5 раза. Если содержание органических веществ в водоеме велико, то для их окисления бактериями и простейшими может израсходоваться почти весь имеющийся запас кислорода, тогда в водоеме наступают анаэробные условия.

Содержание растворенного кислорода (Р.К.) в Исаковском водохранилище за 2014–2017 годы представлено на рисунке 4. Предельно-допустимая концентрация (ПДК) Р.К. в холодный период равна 4 мг/дм^3 , в теплый период — 6 мг/дм^3 [6]. Графики изменения концентрации Р.К. (рис. 4) для различных временных промежутков (по годам) показывают сходные тенденции в изменении рассматриваемого показателя по месяцам года. Это позволяет предположить существование цикличности в динамическом ряду концентраций Р.К. с периодом 12 месяцев.

Рассматривая колебания концентрации растворенного кислорода в течение года, можно заметить, что его снижение начинается с мая и приходит к норме только в сентябре (за исключением 2017 г.) С октября, когда средняя температура воздуха ниже 20°C и температура воды ниже $13\text{--}15^\circ\text{C}$, все замеренные концентрации Р.К. находятся в пределах нормы. Вода в теплый период времени загрязненная (по стандартным критериям качества воды [6]).

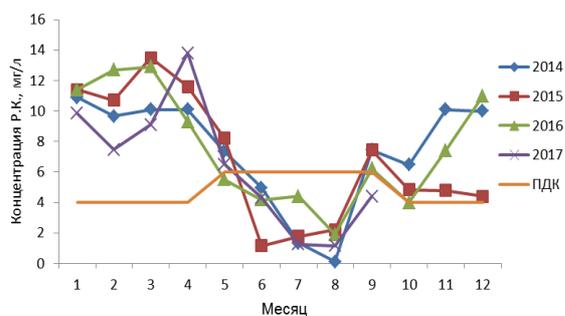


Рисунок 4 Динамика изменения концентрации Р.К. в воде Исаковского водохранилища

С повышением температуры в воде, по нашим данным, наблюдается рост численности фитопланктона, болезнетворных микроорганизмов и органических веществ. Увеличивается скорость окислительных реакций, на которые расходуется кислород.

Биологическое самоочищение воды обуславливается усиленным размножением сапрофитных микробов, которые расщепляют сложные органические соединения до простых минеральных (CO_2 , NH_3) и делают их доступными для питания автотрофных организмов (нитрифицирующих, серо- и железобактерий, водорослей). Основная роль в удалении из водоемов растворимых веществ принадлежит микробам. Кроме сапрофитов, зеленые водоросли и некоторые бактерии — обитатели рек, озер, морей — вырабатывают антибиотические вещества, губительно действующие на попавших в водоемы микробов, среди которых могут быть возбудители инфекционных заболеваний человека или животных. Поэтому при оценке загрязненности водоемов большое значение уделяется микробиологическому анализу.

Наличие определенного количественного и качественного состава микроорганизмов характеризует активность самоочищения водоема, в процессе которого происходит последовательная смена зон сапробности и соответственно смена населяющих их организмов, в том числе и бактерий.

Микробиологические показатели позволяют судить, с одной стороны, об интенсивности и эффективности самоочищения водоемов, поскольку главная роль в удалении из водоема растворимых веществ принадлежит микроорганизмам, с другой — о микробиологическом загрязнении водоемов, особенно патогенными бактериями.

Для микробиологического анализа нами использовался показатель ОМЧ (общее микробное число). При температуре инкубации 37°C определяется индикаторная группа микроорганизмов, в числе которых аллохтонная микрофлора, внесенная в водоем в результате антропогенного загрязнения, в

том числе фекального. ОМЧ при температуре инкубации 20–22 °С выявляет индикаторные группы микроорганизмов, представленные, помимо алохтонной, автохтонной микрофлорой (аборигенной, естественной, свойственной для данного водоёма). Соотношение численности этих групп микроорганизмов позволяет судить об интенсивности процесса самоочищения. В местах загрязнения хозяйственно-бытовыми сточными водами численные значения обеих групп близки.

Для определения интенсивности самоочищения Исаковского водохранилища по формуле (1) был рассчитан коэффициент самоочищения K_c [7]

$$K_c = \frac{ОМЧ(22^{\circ}C)}{ОМЧ(37^{\circ}C)}. \quad (1)$$

Показатель K_c позволяет получить дополнительную информацию о санитарном состоянии водоемов, источниках загрязнения, процессах самоочищения. Низкие значения коэффициента самоочищения служат критерием нарушения экологического равновесия водной экосистемы. В местах загрязнения хозяйственно-бытовыми сточными водами численные значения обеих групп примерно одинаковые, поэтому значения K_c , близкие к единице, свидетельствуют о крайне низком уровне самоочищения водоема.

При завершении процесса самоочищения коэффициент K_c равен 4 и выше [7]. На рисунке 5 показано изменение коэффициента самоочищения Исаковского водохранилища по месяцам. Как видно из рисунка, в летние месяцы в экосистеме водохранилища самоочищение осуществляется на крайне низком уровне ввиду его высокого антропогенного загрязнения.

Снижение уровня самоочищения в марте (рис. 3) объясняется бурным развитием пиропитовых и диатомовых водорослей со значительной биомассой, которые, не-

смотря на выделение большого количества кислорода, снижают активность микроорганизмов по очищению водоема.

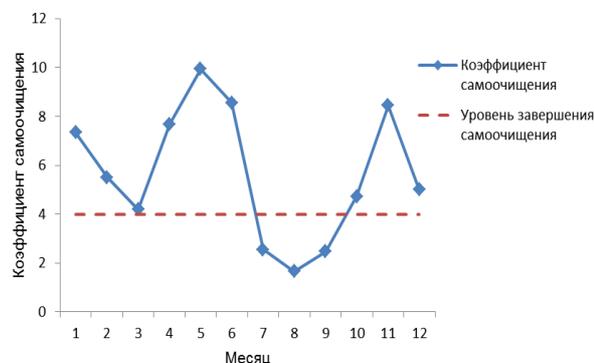


Рисунок 5 Динамика изменения коэффициента самоочищения Исаковского водохранилища

Выводы и направление дальнейших исследований. Таким образом, в течение года Исаковское водохранилище, принимая одни и те же стоки, находится в разном экологическом состоянии. Это связано с изменением климатических условий, изменением численности и активности обитателей водоема, а также характером химических реакций, протекающих в воде. Под воздействием множества как природных, так и антропогенных факторов водохранилище самостоятельно не справляется с загрязнением в летний период. Поэтому в теплый период необходимо активное обогащение воды кислородом, перемешивание водных потоков для равномерного распределения разбавления загрязнений, обеспечение и контроль над очисткой сточных вод, использование приемов экологического обустройства водохранилища.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение экспериментальной и методической базы для комплексной оценки качества поверхностных вод Луганской Народной Республики и разработку комплекса мер по реабилитации водоемов региона.

Библиографический список

1. Охрана природы. Гидросфера. Организация и функционирование подсистемы мониторинга антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем [Текст] : РД 52.24.620-2000. — М. : Росгидромет, 2000. — С. 1–22.
2. Lake restoration: successes, failures and long-term effects [Text] / M. Søndergaard, E. Jeppesen, T. L. Lauridsen et al. // *Journal of applied ecology*. — 2007. — Vol. 44. — P. 1095–1105.
- 3 Каталог водоемов Луганской Народной Республики по состоянию на 01.04.2019 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mprlnr.su/video/420-katalog-vodoevov-luganskoj-narodnoj-respubliki-po-sostoyaniyu-01062017.html>.
4. Разработка водохозяйственных балансов Исаковского водохранилища на р. Белая Луганской области [Текст] / рук. Жуков И. И. — Донецк : ЦКПИВЛ, 2004. — 10 с.
5. Возная, Н. Ф. Химия воды и микробиология [Текст] / Н. Ф. Возная. — М. : Высшая школа, 1979. — 132 с.
6. Абакумов, В. А. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений [Текст] / В. А. Абакумов, Н. П. Бубнова, Н. И. Холикова и др. — Л. : Гидрометеиздат, 1983. — 239 с.
7. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов [Текст] : метод. указания : МУК_4.2.1884-04 : утв. и введ. в действие Гл. гос. санитар. врачом Рос. Федерации 03.03.04 : взамен МУ 2285-81.

© Подлипенская Л. Е.

© Бакуменко Ю. С.

**Рекомендована к печати к.х.н., зав. КМНИЛ НЦМОС ДонГТИ Смирновой И. В.,
к.т.н., нач. отдела ЭБ по вопросам ЧС и ЭБ Администрации г. Алчевска ЛНР
Проскуриной И. В.**

Статья поступила в редакцию 11.06.2020.

Ph.D. Podlipenskaya L. E., Bakumenko Yu. S. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

RESEARCH ON EUTROPHICATION AND SELF-PURIFICATION PROCESSES IN WATER BODIES

Investigations on the pollution and self-purification processes of surface waters were carried out by the example of the Isakovo storage lake. The parameters that determine the self-purification process of surface water have been identified. The analysis has been done for the change dynamics on the concentration of dissolved oxygen in water and the coefficient of self-purification of the water body.

Key words: *Isakovo storage lake, self-purification, eutrophication, dissolved oxygen.*