

# ЭНТРОПИЙНЫЙ ИНДЕКС: ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Трофимчук М. М.

ФГБУ «Гидрохимический институт», г. Ростов-на-Дону

E-mail: [m.trofimchuk@gidrohim.mecom.ru](mailto:m.trofimchuk@gidrohim.mecom.ru)

Проведена оценка состояния 42 речных и 13 озерных систем Европейской территории России и Сибири в различных природно-климатических зонах и при разной антропогенной нагрузке, с различными уровнями загрязнения по УКИЗВ и различной минерализацией, как одним из существенных факторов окружающей среды природного происхождения. В качестве оценочного критерия использован энтропийный индекс. Для расчета энтропийного индекса использованы данные ГНС по концентрации растворенного кислорода и температуре воды. Выявлен ряд закономерностей динамики термодинамического состояния водных экосистем, позволяющих судить о характере и уровне антропогенной нагрузки. В статье обсуждаются преимущества и перспективы применения предложенного подхода в мониторинге поверхностных вод.

Водные экосистемы, энтропийный индекс, загрязнение, минерализация.

При организации системы мониторинга изначально устанавливалась необходимость не только наблюдений за источниками и факторами антропогенных воздействий, но прежде всего за реакцией биологических систем на эти воздействия [1]. Существует множество методов и подходов оценки отклика отдельных биотических структур водных экосистем на изменение факторов внешней среды. Часть из них применяется в наблюдательных структурах Росгидромета [2, 3].

Существенный недостаток упомянутых подходов – методологический: в них не принимается во внимание представление об экосистеме как целостной живой системе, обладающей эмерджентным свойством, не являющимся простой суммой свойств составляющих ее элементов, а также тот факт, что «реакция экосистемы на изменение факторов среды отличается от реакции организма. Организм в ответ на изменение факторов изменяет функцию, сохраняя структуру, а экосистема, наоборот, меняет структуру, сохраняя функцию» [4].

Решение проблемы интегральной экологической оценки состояния водных объектов лежит на наш взгляд в области термодинамики с ее макроскопическими подходами в описании сложных самоорганизующихся систем. Ранее авторами работ [5 – 7] была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность оценки состояния водных экосистем на основе продукционно–деструкционных показателей в термодинамической интерпретации. Однако особенности организации мониторинга водных объектов, проводимого на государственной наблюдательной сети подразделениями Росгидромета, не позволяют выполнять продукционно-деструкционные исследования в классическом исполнении в необходимых масштабах. В тоже время основой для расчета изменения энтропии водных экосистем в зависимости от условий существования могут служить гидрохимические показатели такие, как концентрация растворенного кислорода и температура воды [8].

Ранее нами был предложен теоретически обоснованный метод оценки состояния водных экосистем на основе изменения энтропии водных экосистем – энтропийного индекса, который рассчитывается по формуле  $\Delta S_t = \ln T_2/T_1$ , где  $T_1$  – температура воды в водном объекте;  $T_2$  – температура воды, соответствующая 100% насыщению кислородом при измеренной концентрации кислорода [9]. В основе метода лежит представление о

биотическом балансе вещества и энергии, о сбалансированности процессов первичного фотосинтетического продуцирования и деструкции органического вещества. Изменение баланса, вызванное как естественными причинами, так и негативными антропогенными воздействиями, сопровождается соответствующим изменением энтропии. Таким образом, изменение энтропии экосистемы (энтропийный индекс) характеризует изменение состояния экосистемы. Рост энтропии свидетельствует об ухудшении условий существования экосистем, усилении процессов деградации.

В рамках этого способа разработана шкала оценки, включающая пять градаций экологического состояния экосистем – от предельно благополучного (значение энтропийного индекса от -0,123 до 0,062) до предельно неблагополучного (значение энтропийного индекса от 0,250 до 0,312) [10].

На основе предложенной классификации была проведена оценка состояния 42 речных и 13 озерных систем в 85 пунктах на Европейской территории и Сибири в различных широтных зонах и при разной антропогенной нагрузке, с различными уровнями загрязнения по УКИЗВ и различной минерализацией, как одним из существенных факторов окружающей среды природного происхождения. Для анализа использовался массив данных за многолетний период (2010 – 2020 гг. для Сибири, 2014 – 2019 гг. для Европейской территории) режимной гидрохимической информации.

Первое, что обращает на себя внимание, это несоответствие класса качества воды, установленного по УКИЗВ, и экологического состояния большинства водных объектов. Экосистемы 98% исследованных водных объектов находятся в благополучном и предельно благополучном состоянии, в то время как по степени загрязнения 91% водных объектов относится к категориям от загрязненных до предельно грязных. Этот факт еще раз подчеркивает, что недопустимо отождествление показателя загрязненности воды и состояния экосистемы.

Анализ многолетней динамики энтропийного индекса позволил выявить ряд характерных особенностей в динамике состояния водных экосистем. Типологические особенности водных объектов, обусловленные природно-климатическими условиями их формирования, не оказывают заметного влияния на функциональное состояние экосистем. Подавляющее большинство экосистем находятся в благополучном состоянии, при том, что минерализация среды обитания отличается на несколько порядков. Это отчетливо проявляется при сравнении различных водотоков, каждый из которых протекает в пределах одной природной зоны, и для озерных систем, расположенных в разных природных зонах. Так, состояние экосистем р. Индигирка с минерализацией порядка  $50 \text{ мг/дм}^3$  и р. Средний Егорлык, выше г. Сальск с минерализацией от 2271 до  $5862 \text{ мг/дм}^3$  оценивается как предельно благополучное. Еще один пример – предельно благополучное состояние экосистем оз. Телецкое с максимальной минерализацией воды  $128,1 \text{ мг/дм}^3$  и оз. Шира, минерализация которого достигает  $24420,4 \text{ мг/дм}^3$  (рис. 1а, б).

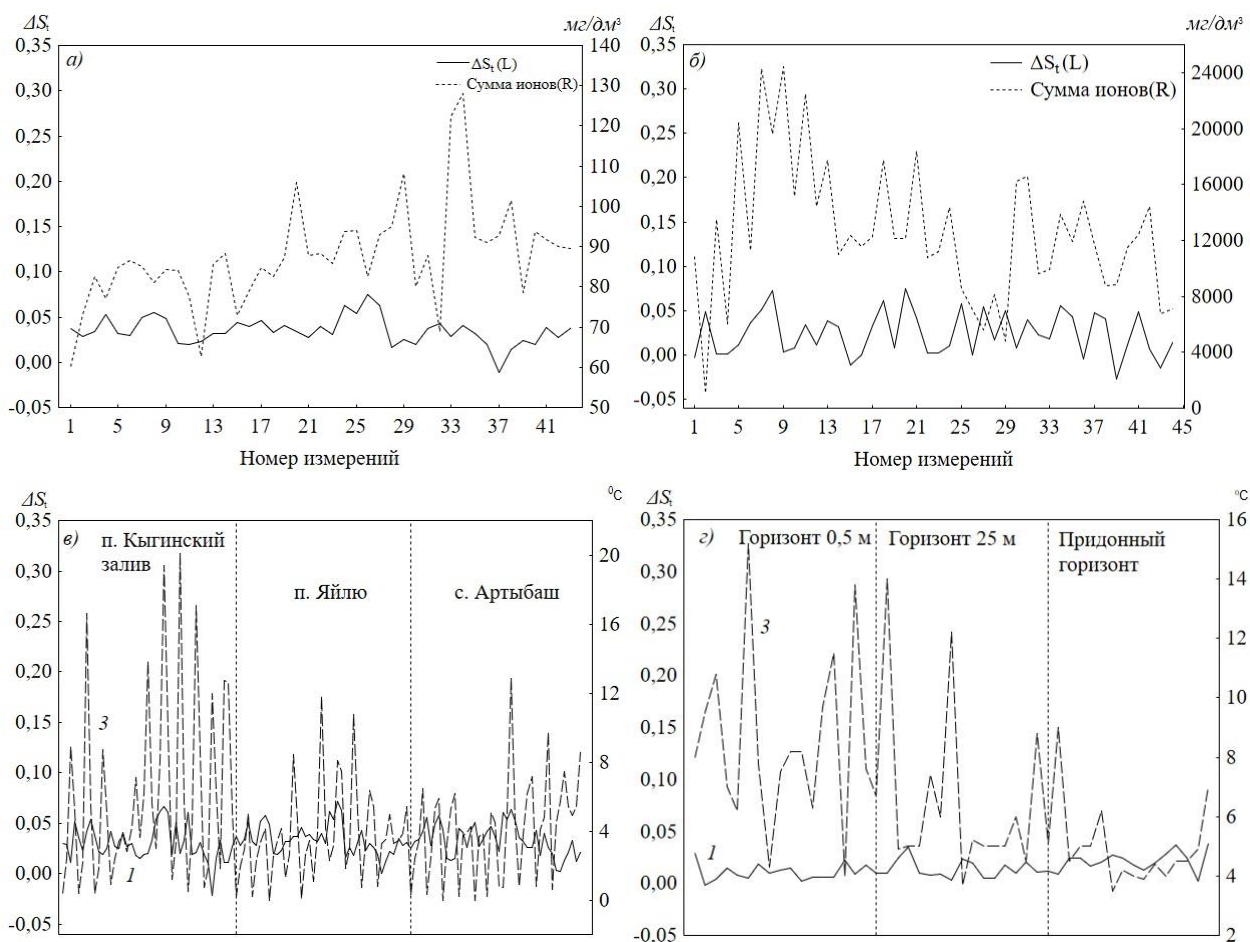
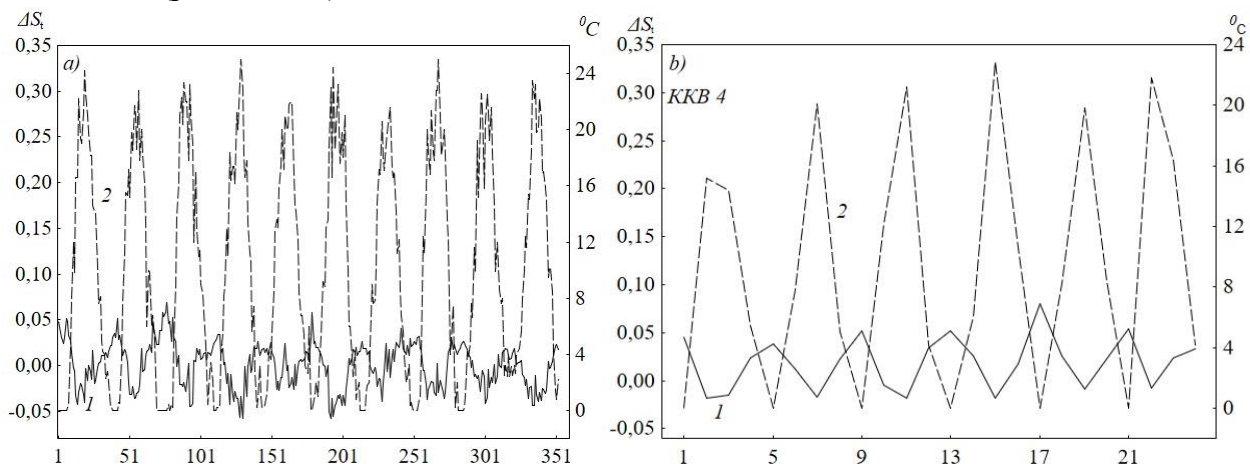


Рис. 1 – Стабильная многолетняя динамика энтропийного индекса водных экосистем (1) при различных физико-химических условиях среды: разной минерализации и температуре (3): а) оз. Телецкое, п. Яйлю, 2010 – 2020 гг.; б) оз. Шира, курорт Жемчужный, 2010 – 2020 гг.; в) оз. Телецкое, три пункта, 2010 – 2020 гг.; г) оз. Байкал, п. Листвянка, три горизонта, 2013 – 2020 гг.

Неизменная динамика энтропийного индекса водного объекта проявляется и на фоне значительных колебаний такого природного фактора, как температура (рис.1в, г.).

Динамика энтропийного индекса благополучных экосистем в большинстве случаев носит выраженный сезонный характер: в холодное время года значения энтропии возрастают, а при повышении температуры и возобновлении фотосинтетической активности снижаются (рис. 2а, б, в).



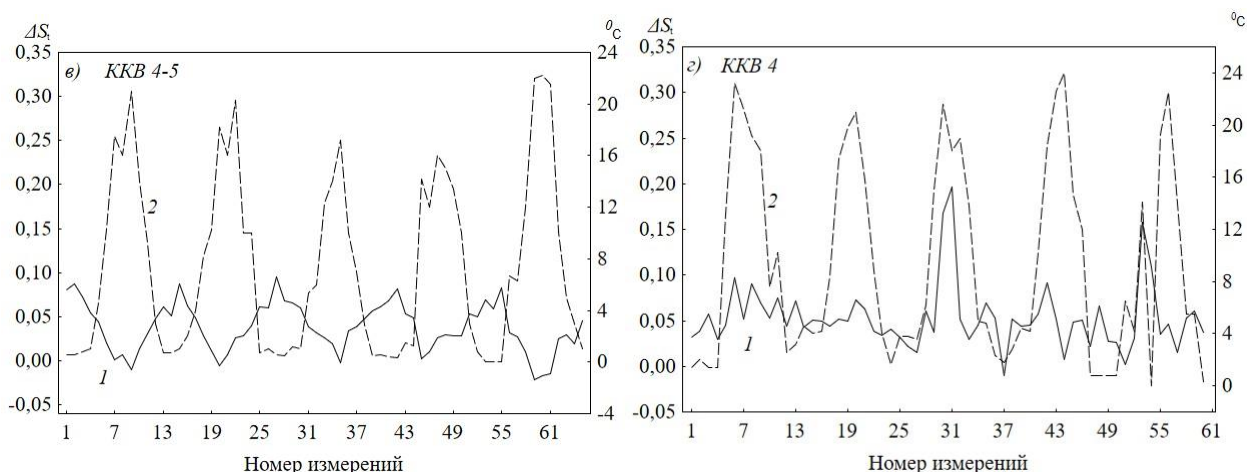


Рис. 2 – Сезонная динамика энтропийного индекса водных экосистем (1); (а – в); и температуры (2) и ее нарушение под антропогенным воздействием (з): а) р. Неман, г. Советск, 2011 – 2020 гг.; б) оз. Учум, курорт Учум, 2015 – 2020 гг.; в) р. Блява, г. Медногорск, 2015 – 2019 гг.; з) р. Исеть, г. Екатеринбург, 2013 – 2017 гг.; (б, в) отличие благополучного состояния экосистем от предельно низкого качества воды.

Незначительный уровень воздействия загрязняющих веществ может проявляться нарушением сезонной динамики без перехода состояния экосистемы в другой класс благополучия (рис. 2г).

Существенное ухудшение качества воды проявляется в возрастании средних показателей энтропии и переходе экосистем в разряд менее благополучных. В этом случае оценка состояния водной экосистемы может соответствовать степени загрязнения по УКИЗВ. В данном случае речь может идти о длительном интенсивном негативном воздействии загрязняющих веществ на водную экосистему, ограничивающем ее возврат в нормальное состояние (рис. 3а, б).

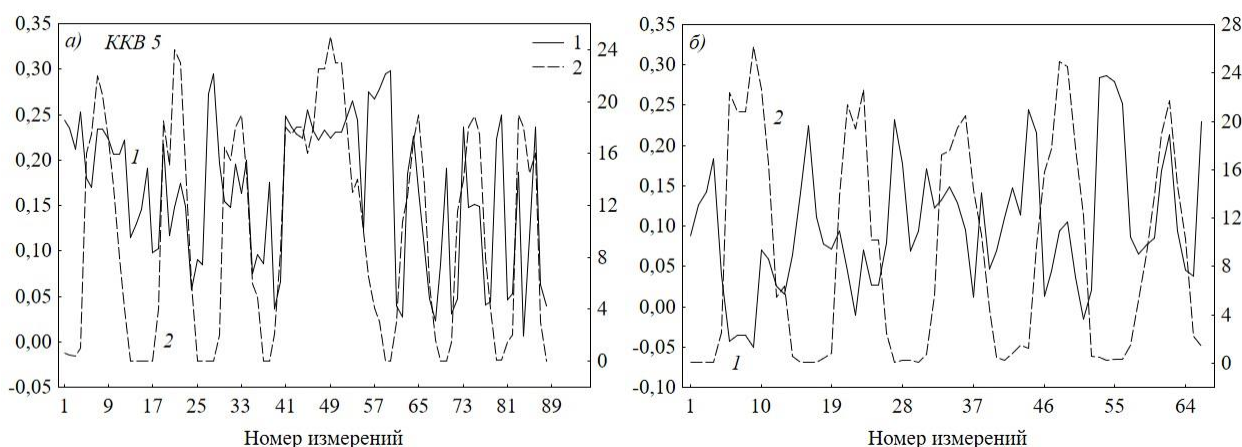


Рис. 3 – Нарушение сезонной динамики и возрастание энтропийного индекса (1) под антропогенным воздействием (класс качества по УКИЗВ – 5) на фоне «нормальных» сезонных изменений температуры (2): (а) р. Пельшма, г. Сокол, 2013 – 2019 гг. (б) р. Бужа, д. Избище, 2013 – 2017 гг.

Энтропийный индекс хорошо отображает изменения состояния водных экосистем от истоков крупных рек к их устьевым областям. В отсутствие значительных локальных

источников загрязнения в пунктах наблюдения такие изменения могут быть обусловлены как различными условиями существования экосистем в различных природно-климатических зонах, в частности длительным периодом низких температур и ледостава, так и накопленным загрязняющим эффектом (рис. 4 а, б).

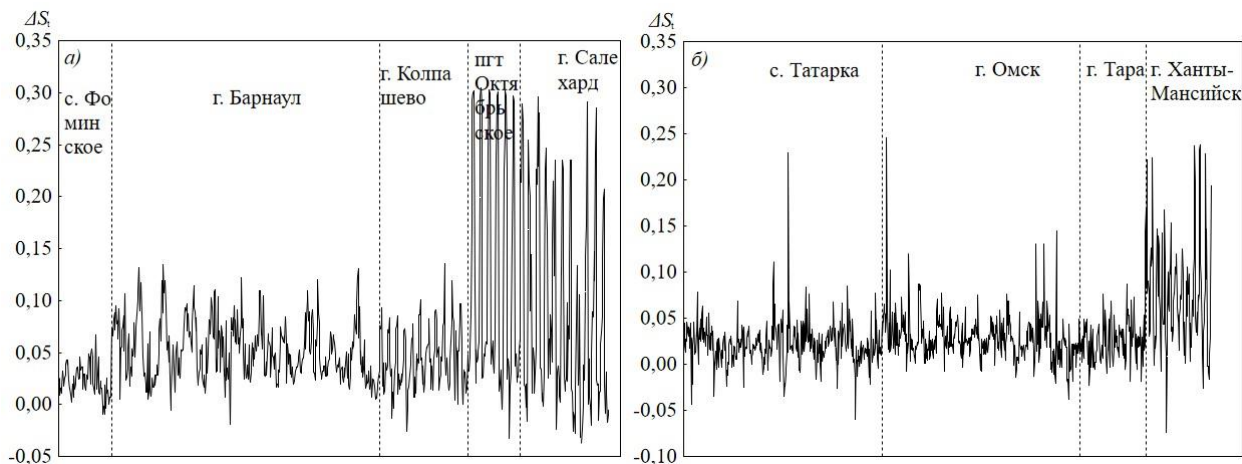


Рис. 4 – Изменение энтропийного индекса водных объектов от истоков к устью: а) р. Обь, 2010 – 2020 гг.; б) р. Иртыш, 2010 – 2020 гг.

В отсутствие ежедневных данных о концентрациях специфических загрязняющих веществ, что характерно для большинства пунктов наблюдения, мониторинг состояния водных экосистем по энтропийному индексу дает более детальную и объективную информацию об интегральном качестве воды водного объекта, как среды обитания биоты (рис. 4 а, б). Примером может служить р. Москва (рис. 4 а).

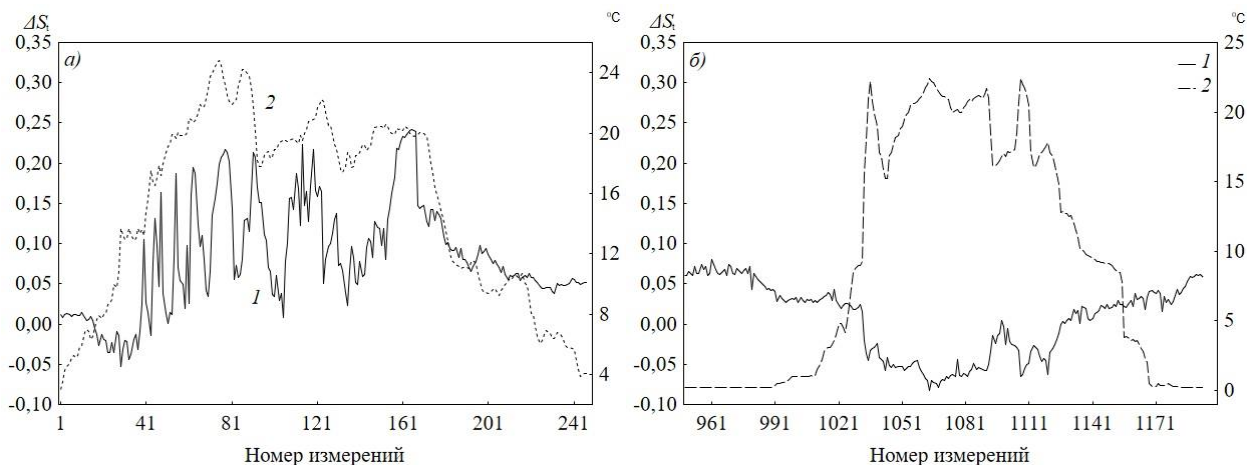


Рис. 5 – Ежедневная динамика энтропийного индекса (I; шкала слева) и температуры (2): а) р. Москва, г. Красногорск, 2019 г.; б) р. Казанка, г. Казань, 2019 г.

По данным, полученным с автоматической станции, установленной в г. Красногорск, среднее значение энтропийного индекса за представленный период (01.04.2019 – 26.11.2019) составляет 0,084, что соответствует благополучному состоянию (рис. 5 а). Однако, динамика энтропийного индекса крайне нестабильна: значения индекса в течение нескольких дней могут меняться от 0,008 до 0,223. Такая нестабильная динамика характерна для всего вегетационного периода, что может указывать на реакцию водной экосистемы р. Москва на

негативное антропогенное воздействие. Следует отметить также общую тенденцию возрастания значений энтропийного индекса с ростом температуры. Возможная причина такого поведения экосистемы – активизация микробиологических процессов окисления, что может говорить о значительном загрязнении реки органическими веществами. В отличие от предыдущего примера, ежедневные наблюдения на реке Казанка в г. Казань выявляют характерную тенденцию сезонной динамики энтропийного индекса: снижение значений с повышением температуры (рис. 5 б). Однако на фоне общей тенденции проявляются периодические всплески энтропии, не меняющие, впрочем, уровня благополучия экосистемы.

Анализ динамики энтропийного индекса позволил выявить ряд общих закономерностей, присущих водным объектам различной типологии, с существенно отличающимися условиями формирования гидрохимического режима и качеством воды. Между состоянием экосистемы, уровнем ее благополучия и степенью загрязненности водного объекта нет прямой связи. И это вполне объяснимо. Степень загрязнения характеризует качество окружающей среды, а отклонение энтропии от нормы – состояние экосистемы, существующей в данной окружающей среде, т. е. результат воздействия загрязнения. Состояние экосистемы, уровень ее благополучия, не всегда связано со степенью загрязненности водного объекта по ряду причин, одна из которых – возможность адаптации экосистем к негативным воздействиям, другая – возможные трансформации загрязняющих веществ в природных водах, влекущие изменение их токсических свойств. Помимо этого, многие нормируемые вещества не являются ксенобиотиками и в тех или иных концентрациях постоянно присутствуют в водной среде, зачастую многократно превышая законодательно установленные нормы, при этом имея природный генезис. Водные экосистемы проявляют чрезвычайную лабильность, приспособляясь к экстремальным условиям среды и сохраняя сбалансированное функционирование за счет изменения видового состава.

В этих условиях неправомерно классифицировать водный объект негативными категориями, не принимая во внимание состояние экосистемы. В тоже время очевидно, что реакция водных экосистем на загрязняющие вещества антропогенного происхождения может быть негативной. Увеличение концентрации загрязняющих веществ в воде до критического уровня или их продолжительное воздействие может превысить адаптационные возможности экосистем и привести к изменению их состояния, к той или иной степени деградации. Это проявляется нестабильной временной динамикой, нарушением сезонного ритма и повышенными значениями энтропийного индекса.

Однако следует подчеркнуть, что оценка состояния водных экосистем – одно из направлений мониторинга состояния и загрязнения вод. Не менее важной задачей является оценка качества, в том числе уровня загрязнения воды водных объектов, как среды обитания важных рыбохозяйственных объектов – промысловых рыб и беспозвоночных и их кормовой базы, и как источника питьевого водоснабжения. В этом случае важно знать концентрации загрязняющих веществ.

Поэтому следует отметить, что для оценки состояния конкретных водных объектов, необходим детальный анализ всего комплекса гидрохимических и гидробиологических показателей. Чрезмерное сворачивание информации может в отдельных случаях приводить к ошибочным оценочным суждениям. Тем не менее, на наш взгляд, очевидны достоинства термодинамической оценки состояния водных экосистем по энтропийному индексу. Базой для расчета энтропийного индекса служат регулярные данные, получаемые на

государственной наблюдательной сети на пунктах всех категорий. Энтропийный индекс может являться финальной оценкой экологического состояния водного объекта, если таковое отнесено к разряду благополучного. В случае оценки водных объектов как неблагополучных, может служить основой для принятия решения о более детальном исследовании. Такой дифференцированный подход к оценке экологического состояния дает возможность сокращения количества наблюдений за загрязняющими веществами в благополучных водных объектах и более детальном исследовании неблагополучных.

1. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. – Л.: Гидрометеиздат, 1979, 376 с.
2. РД 52.24.309 – 2016 Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Ростов-на-Дону, 2016.
3. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 240 с.
4. Керженцев А.С. Новое перспективное научное направление // Вестник Российской академии наук. – 2012. – том 82. – №5. С. 432 – 440.
5. Никаноров А.М., Трофимчук М.М. Особенности термодинамики внутриводоемных процессов в пресноводных экосистемах при антропогенном воздействии // Доклады РАН. – 2010. – т. 433. – №2. С. 254 – 256.
6. Никаноров А.М., Трофимчук М.М. Термодинамика внутриводоемных процессов в пресноводных экосистемах при антропогенном воздействии // Водные ресурсы. – 2011. – т. 38. – № . С. 454 – 463.
7. Никаноров А.М., Трофимчук М.М. Метаболическая мощность экосистем как мера их устойчивости к внешним воздействиям // Доклады академии наук. 2013. – т. 448. – № 3. С. 338-341.
8. Трофимчук М.М. О возможности оценки экологического состояния водных объектов на основе энтропии // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 7. С. 80 – 86.
9. Трофимчук М. М. Способ оценки экологического состояния водных объектов. Патент на изобретение № 2721713.
10. Трофимчук М.М. Энтропийный индекс – новые возможности в оценке экологического состояния водных экосистем // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 11. С. 46 – 52.

# **ENTROPY INDEX: PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE THERMODYNAMIC APPROACH IN ASSESSING THE STATE OF WATER ECOSYSTEMS**

***Trofimchuk M.M.***

*Federal state budget institution «Hydrochemical institute»*

## **Abstract**

The state of 42 river and 13 lake systems of the European territory of Russia and Siberia was assessed in various natural and climatic zones and under different anthropogenic load, with different levels of pollution according to the specific combinatorial index of water pollution (UKIZV) and different mineralization, as one of the significant environmental factors of natural origin. The entropy index was used as an evaluation criterion. To calculate the entropy index, the data of the State Observational Network on the concentration of dissolved oxygen and water temperature were used. A number of regularities in the dynamics of the thermodynamic state of aquatic ecosystems have been revealed, which make it possible to draw conclusions about the nature and level of anthropogenic load. The article discusses the advantages and prospects of using the proposed approach in surface water monitoring.

Key words: Aquatic ecosystems, entropy index, pollution, mineralization.