

**ВСЕРОССИЙСКИЙ ОБЪЕДИНЕННЫЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ СЪЕЗД  
«ВОЗДУХ, ВОДА И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ»**  
Санкт-Петербург, 29 – 31 октября 2024 г.



# **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЕДЕНИЯ ЭНТРОПИИ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ РАЗЛИЧНЫХ ВОДОЕМОВ И ВОДОТОКОВ РОССИИ**

**Трофимчук М.М.**

ФГБУ "Гидрохимический институт" г. Ростов-на-Дону, Россия.

[info@gidrohim.mecom.ru](mailto:info@gidrohim.mecom.ru)

## ПДК

Адаптация экосистем к негативным воздействиям

Экстраполяция лабораторных экспериментов на водные объекты

Трансформации загрязняющих веществ в природных водах

Игнорирование природно-климатических и биогеохимических особенностей водных объектов

Количество вновь синтезированных химических веществ на несколько порядков выше количества нормированных

## Биоиндикация

Основные методики ориентированы на оценку степени органического загрязнения.

Несоответствие видов-индикаторов видовому составу водных объектов России

Гидробиологические анализы трудоемки, требуют высококвалифицированных гидробиологов-систематиков и т. д.

- Пренебрежение свойством эмерджентности экосистем.
- Организм реагирует на изменение среды изменением функции, чтобы сохранить структуру, экосистема меняет структуру, чтобы сохранить функцию.

### **Оценки состояния водных экосистем должны основываться:**

- на обобщенных термодинамических характеристиках функционирования экосистем, представленных традиционными гидробиологическими показателями.
- соотношение затрат энергии на создание и поддержание биоты экосистемы и интенсивности фотосинтеза - R/P, характеризует уровень упорядоченности экосистемы т. е. ее «удаленность» от полной деградации.
- на фундаментальных закономерностях функционирования открытых самоорганизующихся систем
- на системном подходе

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ЭВОЛЮЦИИ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ



Диссипативные системы -  $dS = d_i S + d_e S$ ;  $d_i S \geq 0$  всегда.  $d_e S > 0$  - приток энтропии;  $d_e S < 0$  - отток энтропии.

В живых системах в соответствии теоремой Пригожина, скорость производства энтропии, отнесенная к единице массы живой системы, т. е. удельная диссипативная функция, уменьшается не до нуля, а до минимальных значений. При этом живая система достигает стационарного состояния.

Принцип наименьшей диссипации энергии: в устойчивом состоянии любой термодинамической системы скорость диссипации энергии в ней минимальна (Зотин А. И.).

Интегральный принцип наименьшей диссипации энергии: устойчивым является такой неравновесный процесс, при котором суммарная удельная диссипация энергии в системе за изучаемый отрезок времени минимальна (Зотин А. И., Зотина Р. С.).

Если допустимо не единственное состояние системы (процесса), а целая совокупность состояний, то реализуется то ее состояние, которому отвечает минимальное рассеяние энергии, или, что тоже самое, минимальный рост энтропии (Моисеев Н. Н.).



$$\begin{aligned}
 & 1) \frac{d\sigma}{dt} \leq 0, \quad 2) \sigma = \frac{T}{V} \frac{diS}{dt} \approx \dot{q} \quad 3) \dot{q} = \frac{T}{B} \frac{dQ}{dt} \\
 & 4) \dot{q} = T \left( \frac{R}{\bar{P}} \right) \quad 5) \frac{d\dot{q}}{dt} \leq 0 \quad 6) \bar{\dot{q}} = \min \quad 7) \frac{d\bar{\dot{q}}}{dt} \leq 0 \\
 & \bar{\dot{\sigma}} = \bar{T} \Delta(\bar{R}/\bar{P}) \quad \rightarrow \min \leq 0
 \end{aligned}$$

$T$  – абсолютная температура,  $V$  – объем системы,  $diS/dt$  – скорость производства энтропии,  $\dot{q}$  – интенсивность теплопродукции,  $\sigma$  – диссипативная функция,  $P$  – продукция,  $R$  – деструкция

Основываясь на изложенном подходе при проведении многочисленных натуральных экспериментах по изучению негативных, в том числе токсических, воздействий на водные экосистемы, были выявлены следующие закономерности функционирования экосистем:

- Водным экосистемам внутренне присуще функционирование с регулярной сменой режимов: стационарные состояния, характеризующиеся минимальными значениями скорости изменения отношения деструкции к продукции, перемежаются нестационарными режимами с резким возрастанием величины  $\Delta(R/P)\Delta t^{-1}$ .
- Устойчивые стационарные состояния водных экосистем вероятны в довольно узких пределах значений отношения деструкции к продукции. Области фазового пространства, лежащие в этих пределах, выступают в качестве аттракторов оптимального состояния экосистем. Возврат в эту область происходит даже после полной гибели живых компонентов экосистемы при их восстановлении.
- Переход экосистем из одного состояния в другое происходит не плавно, а скачкообразно в моменты бифуркации, при нулевых значениях  $\Delta(R/P)\Delta t^{-1}$  и резком изменении направления фазовой траектории, благодаря чему появляется возможность надежно отделить одно состояние от другого и установить пороговые воздействия.
- Под воздействием внешних факторов фазовый объем сокращается и, в случае превышения уровня воздействия выше критической величины, аттракторы формируются в другой области фазового пространства, при этом изменение фазового объема зависит от величины воздействия.
- Реакция экосистем на внешние воздействия зависит от их исходного состояния (режима функционирования) в момент воздействия, характеризуемого величиной  $\Delta(R/P)\Delta t^{-1}$ , которую можно интерпретировать как **удельную метаболическую мощность экосистемы**. Эта величина характеризует потенциальную возможность экосистемы использовать с необходимой скоростью необходимые энергетические ресурсы для сохранения своего состояния в изменившихся условиях и **может рассматриваться в качестве меры устойчивости экосистем к внешним, в т.ч. токсическим воздействиям.**

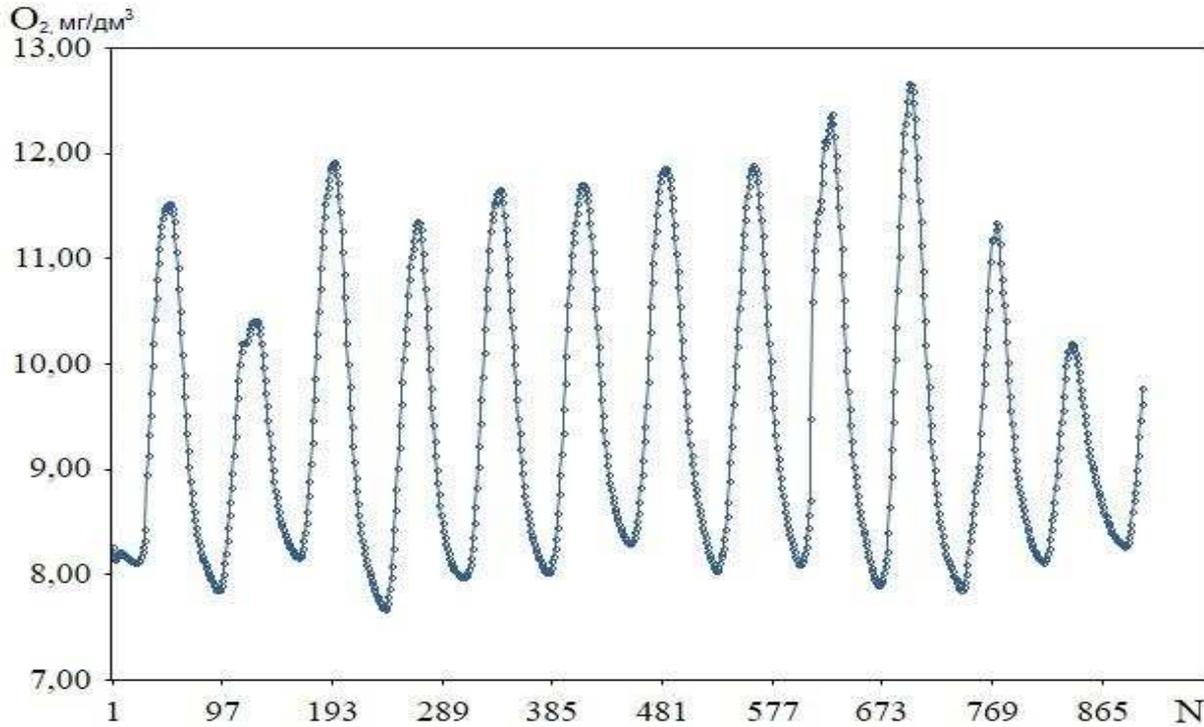
Представленные особенности функционирования водных экосистем позволяют:

- фиксировать момент изменения состояния экосистем, а следовательно определять пороговые значения антропогенных нагрузок
- определять степень устойчивости водных экосистем к антропогенным воздействиям с учетом режима их функционирования, а следовательно устанавливать предельно допустимые экологические нагрузки.
- определить степень благополучия («состояние здоровья») водных экосистем

### Практические перспективы:

Воспроизведение этих закономерностей на реальных водных объектах достижимо с помощью автоматических станций при наличии внутрисуточных данных о скорости изменения концентрации кислорода в воде.

В настоящее время возможно определение степени благополучия водных экосистем на основе оценки изменения энтропии водной экосистемы, обусловленной функционированием ее биоты в данных условиях в данный момент времени. Необходимые характеристики могут быть получены на основе режимных данных Государственной наблюдательной сети Росгидромета.



Внутрисуточное изменение концентрации кислорода в реке Протва (по данным АСКВП НПО «Тайфун». Интервал измерений - 1 мин., усреднение – 20 мин.)

Изменение концентрации кислорода в воде в результате процессов фотосинтетического продуцирования и деструкции органического вещества эквивалентно изменению концентрации кислорода из-за изменения температуры, что, в свою очередь, эквивалентно изменению энтропии экосистемы. Это позволяет определить изменение энтропии, происходящее за счет биологических процессов, аналогично ее изменениям вследствие изменения температуры.

$$\Delta S_t = S_2 - S_1 = cm \ln T_2/T_1$$

$T_1$  – температура воды в водном объекте,

$T_2$  - температура воды, соответствующая 100%-ному насыщению кислородом при измеренной концентрации. Время  $t=const$ ,  $m=const$ ,  $c=const$ . Тогда

$$\Delta S_t = \ln T_2/T_1$$

1. Температура воды  $T_1 = 273,15^\circ\text{K}$  ( $0,0^\circ\text{C}$ ) - концентрация кислорода  $C_{\text{O}_2} = 0,0$  мг/дм<sup>3</sup> соответствует температуре  $T_2 = 373,15^\circ\text{K}$  ( $100^\circ\text{C}$ ).

$$\Delta S_t = \ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \frac{373,15}{273,15} = 0,312 = \text{max. } \textit{Ecosystem is dead!}$$

2. Температура воды  $T_1 = 373,15^\circ\text{K}$  ( $100^\circ\text{C}$ ) – концентрация кислорода  $C_{\text{O}_2} = 14,62$  мг/дм<sup>3</sup> соответствует температуре  $T_2 = 273,15^\circ\text{K}$  ( $0,0^\circ\text{C}$ ).

$$\Delta S_t = \ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \frac{273,15}{373,15} = -0,312 = \textit{min}$$

2.1. Температура воды  $T_1 = 309,15^\circ\text{K}$  ( $36^\circ\text{C}$ ) – концентрация кислорода  $C_{\text{O}_2} = 14,62$  мг/дм<sup>3</sup>. «Равновесная» температура  $T_2 = 273,15^\circ\text{K}$  ( $0,0^\circ\text{C}$ ).

$$\Delta S_t = \ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \frac{273,15}{309,15} = -0,123 = \textit{min}$$

Класс состояния	Энтропийный индекс ( $\Delta S_t$ )	Экологическое состояние
1	-0,123 – 0,062	Предельно благополучное
2	0,063 – 0,124	Благополучное
3	0,125 – 0,187	Удовлетворительное
4	0,188 – 0,249	Неблагополучное
5	0,250 – 0,312	Предельно неблагоприятное

## Сравнительная оценка состояния водных объектов (средние значения за период наблюдения; выборочные пункты)

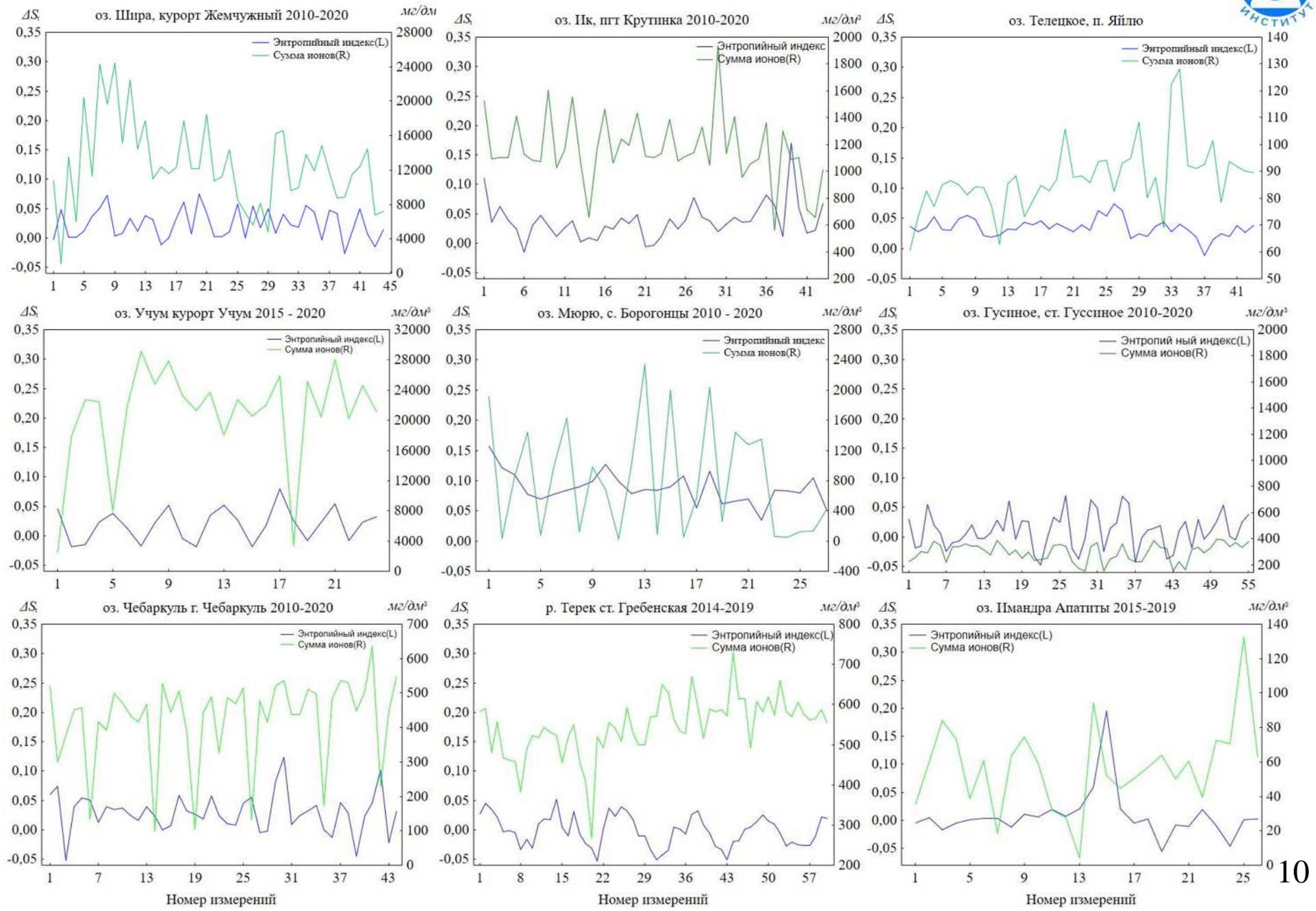
Водный объект	Пункт наблюдений	Класс качества по УКИЗВ	Энтропийный индекс	Класс благополучия	Сумма ионов, мг/дм <sup>3</sup>
Зона тундры-лесотундры					
р. Печенга	п. Корзуново	4	0,017	1	75,0
р. Печора	г. Нарьян-Мар	3	0,081	2	84,4
р. Обь	г. Салехард	4	0,086	2	204,7
оз. Имандра	г. Мончегорск	3	0,003	1	36,1
оз. Мюрю	с. Борогонцы	3	0,088	2	753,9
Зона тайги					
р. Печора	с. Усть-Цильма	3	0,024	1	95,5
р. Пельшма	г. Сокол	5	0,164	3	386,3
р. Вычегда	д. Гавриловка	3	0,067	2	103,3
р. Северная Двина	г. Красавино	4	0,030	1	339,8
р. Лена	г. Киренск	2	0,044	1	364,3
р. Ангара	г. Ангарск	1-2	0,011	1	119,4
р. Кеть	д. Волково	4	0,037	1	150,7
р. Вилюй	г. Вилюйск	3	0,049	1	102,1
р. Карабула	ст. Карабула	4	0,025	1	323,0
оз.Ладожское	г. Лахденпохья	2	0,005	1	68,9
оз. Шира	п. Жемчужный	3-4	0,024	1	12587,3
оз. Телецкое	п. Яйлю	1-2	0,034	1	89,6

# Сравнительная оценка состояния водных объектов (средние значения за период наблюдения; выборочные пункты)

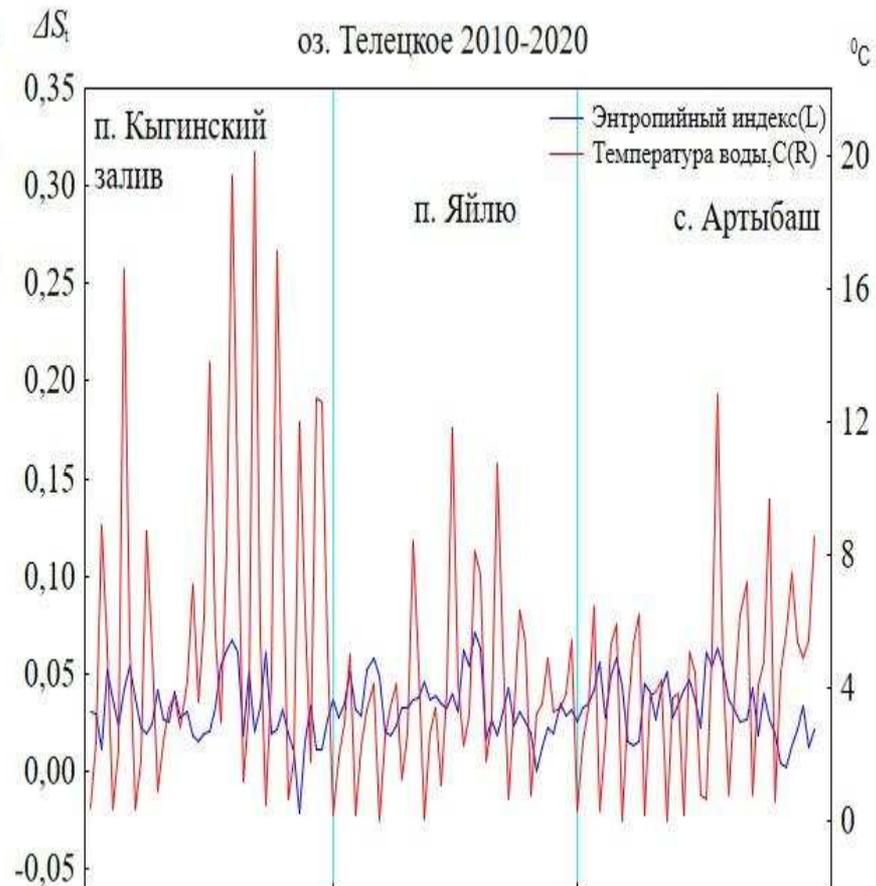
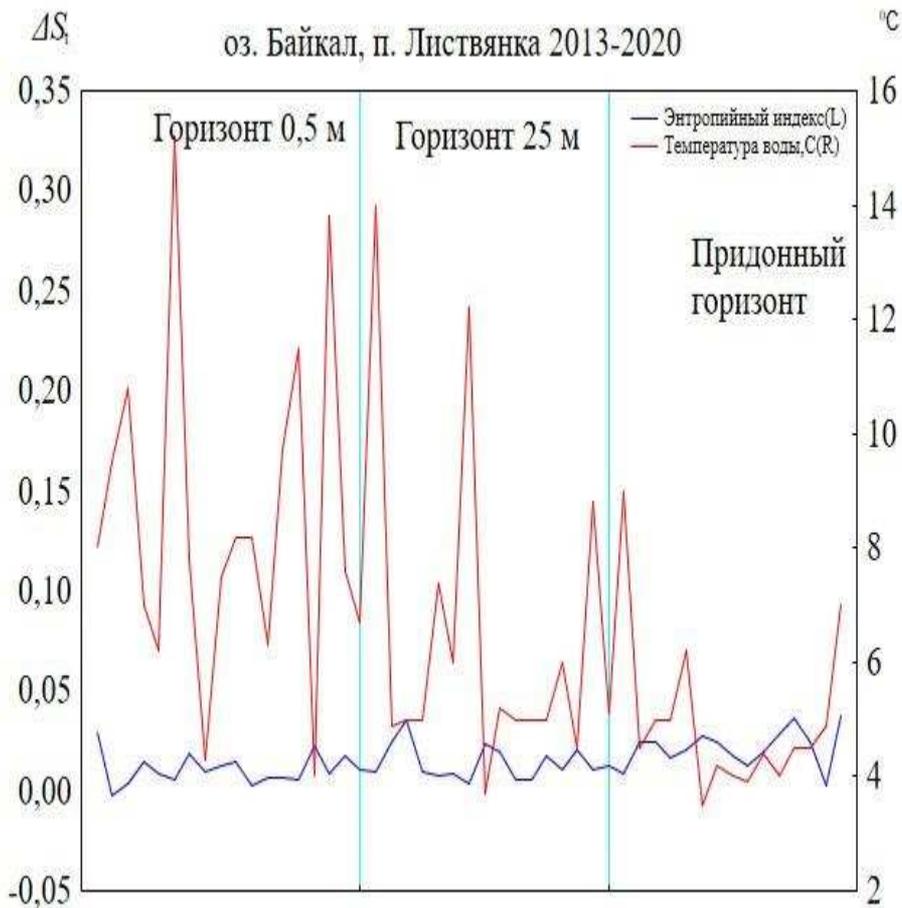


Водный объект	Пункт наблюдений	Класс качества по УКИЗВ	Энтропийный индекс	Класс благополучия	Сумма ионов, мг/дм <sup>3</sup>
<b>Зона смешанных и широколиственных лесов</b>					
р. Нева	г. Санкт-Петербург	3	0,007	1	88,4
р. Клязьма	г. Владимир	4	0,048	1	311,4
р. Казанка	г. Казань	4	0,016	1	863,5
р. Кама	г. Чайковский	3	0,024	1	222,0
р. Преголя	г. Калининград	5	0,025	1	2004,8
р. Блява	г. Медногорск	4	0,038	1	832,6
р. Шегарка	с. Бабарыкино	3-4	0,045	1	428,0
оз. Галичское	г. Галич	3	0,058	1	281,4
оз. Плещеево	г. Переславль-Залесский	2	0,036	1	274,0
<b>Лесостепная и степная зоны</b>					
р. Сал	Устье	4	0,026	1	1468,3
р. Маныч	ст-ца Манычская	4	0,019	1	1548,8
р. Тузлов	х. Несветай	4	0,024	1	2565,0
р. Ср.Егорлык	г. Сальск	4	0,020	1	3195,4
р. Дон	г. Воронеж	4	0,051	1	493,2
р. Хопер	г. Борисоглебск	3	0,068	2	635,7
р. Обь	г. Барнаул	3	0,052	1	192,8
р. Алей	г. Алейск	4	0,080	2	414,4
оз. Ик	пгт Крутинка	3-4	0,038	1	1162,1
оз. Гусиное	ст. Гусиное Озеро	2-3	0,010	1	295,4

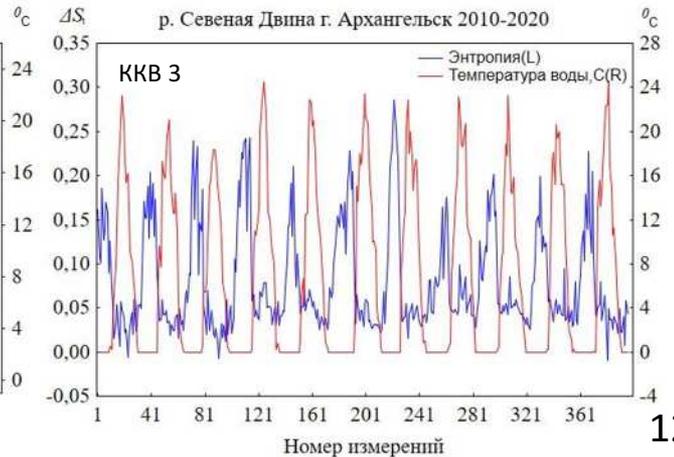
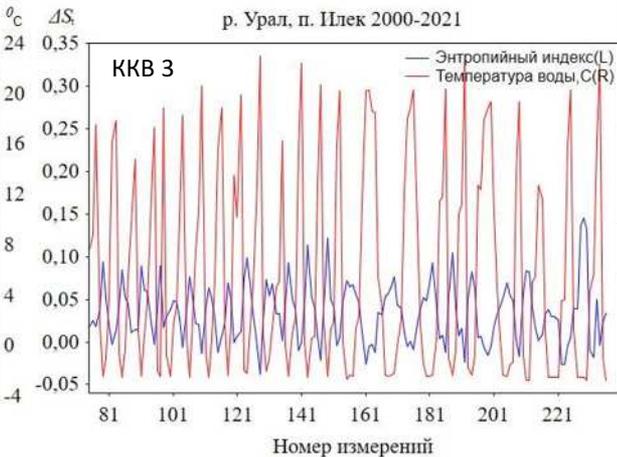
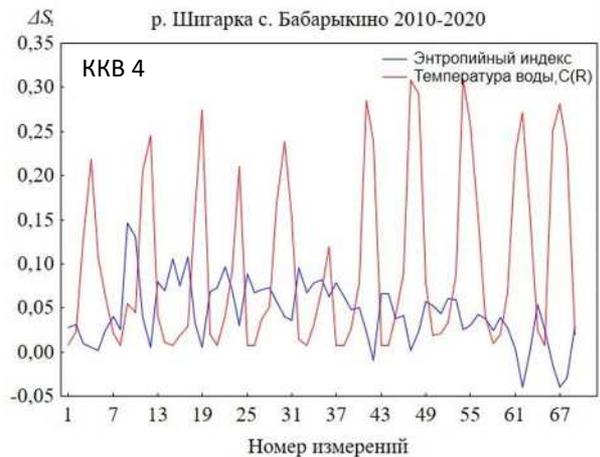
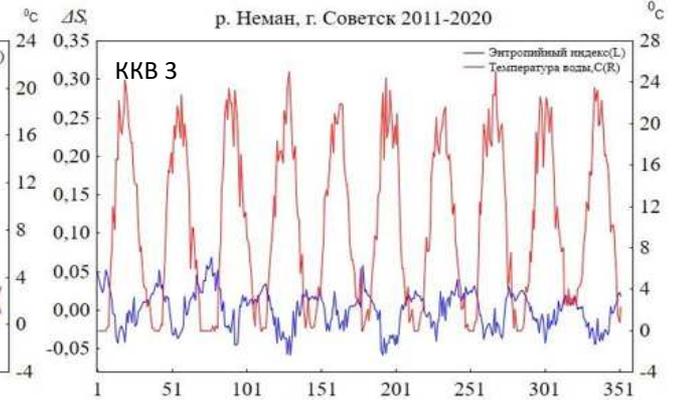
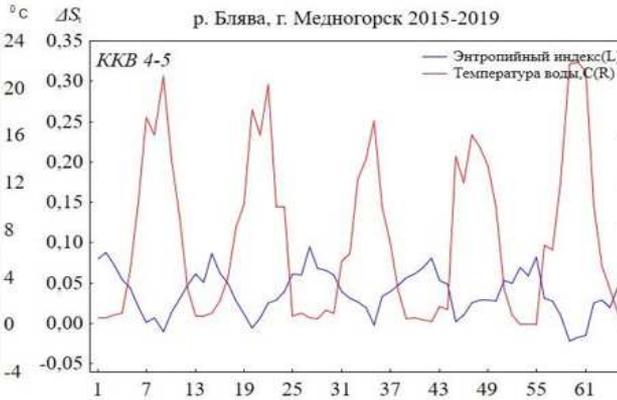
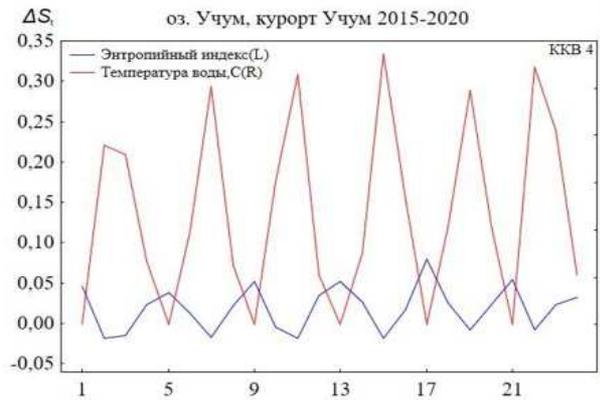
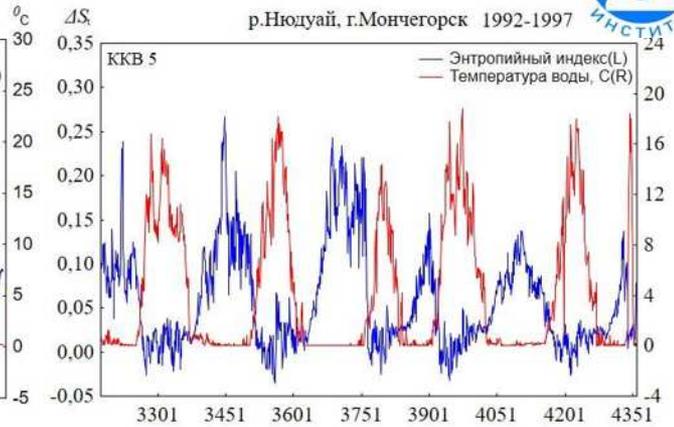
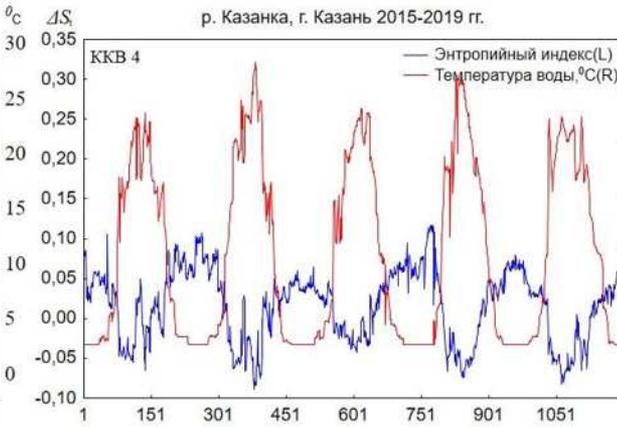
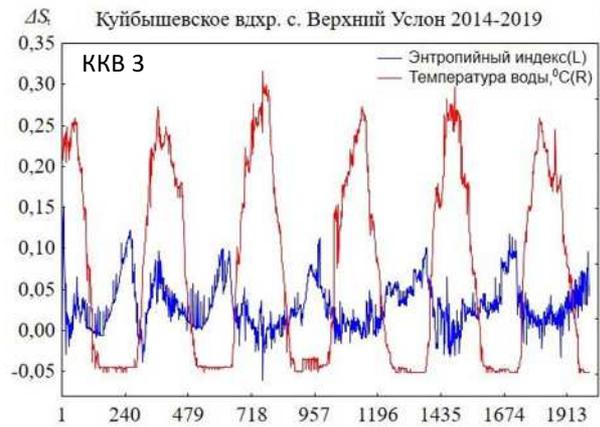
# Энтропийная оценка некоторых водных объектов с различной минерализацией



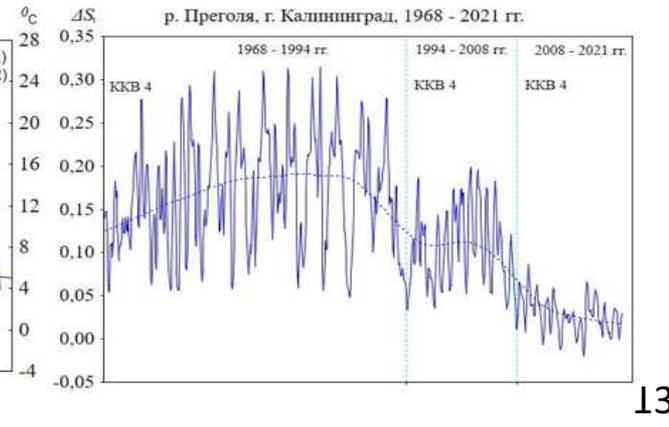
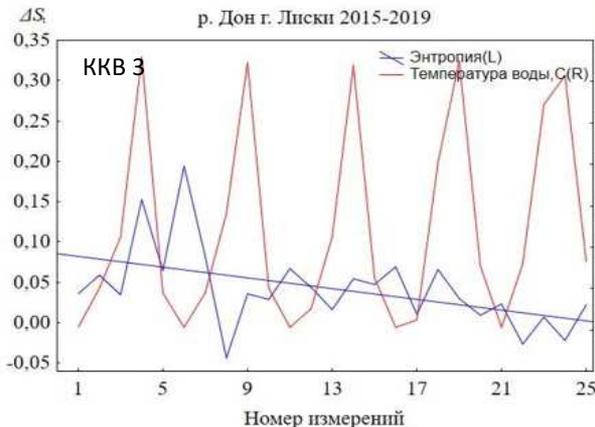
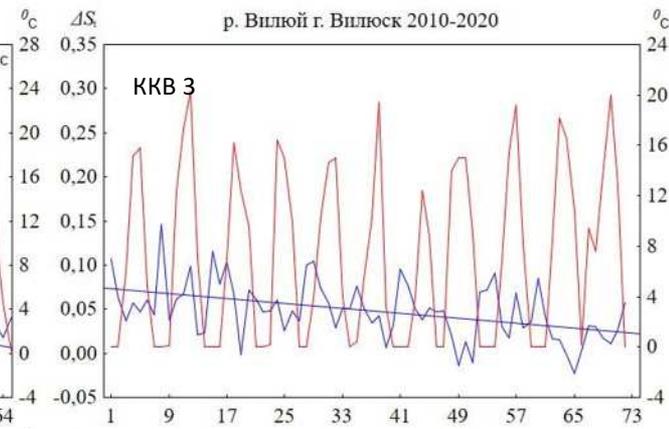
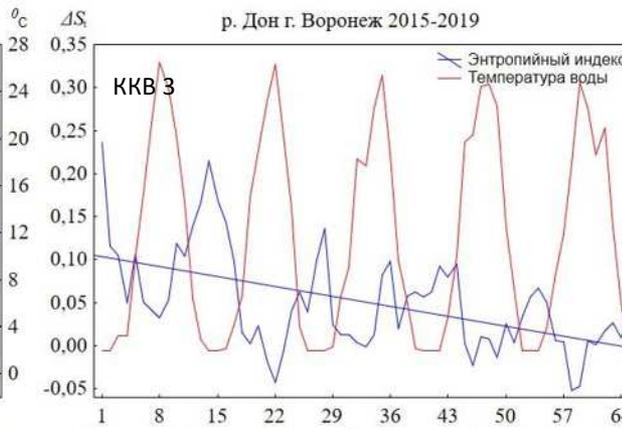
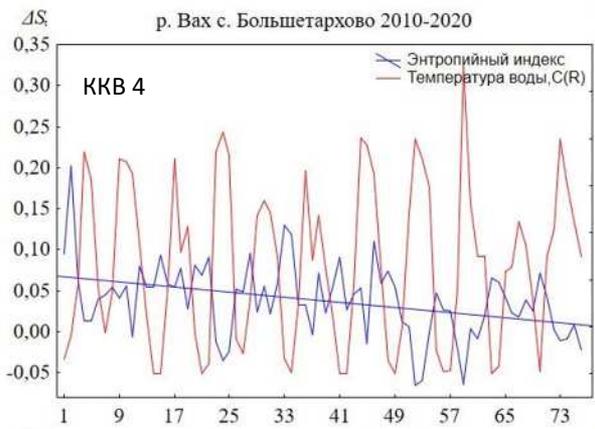
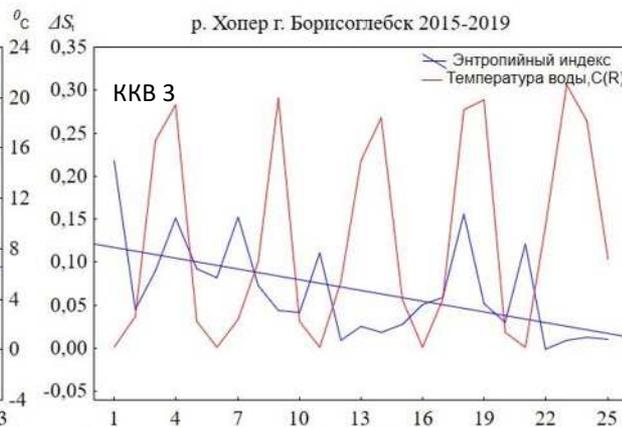
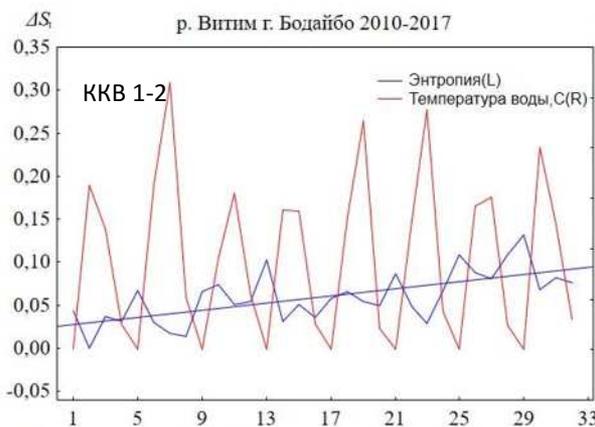
# Энтропийная оценка некоторых водных объектов: пространственно-временная стабильность



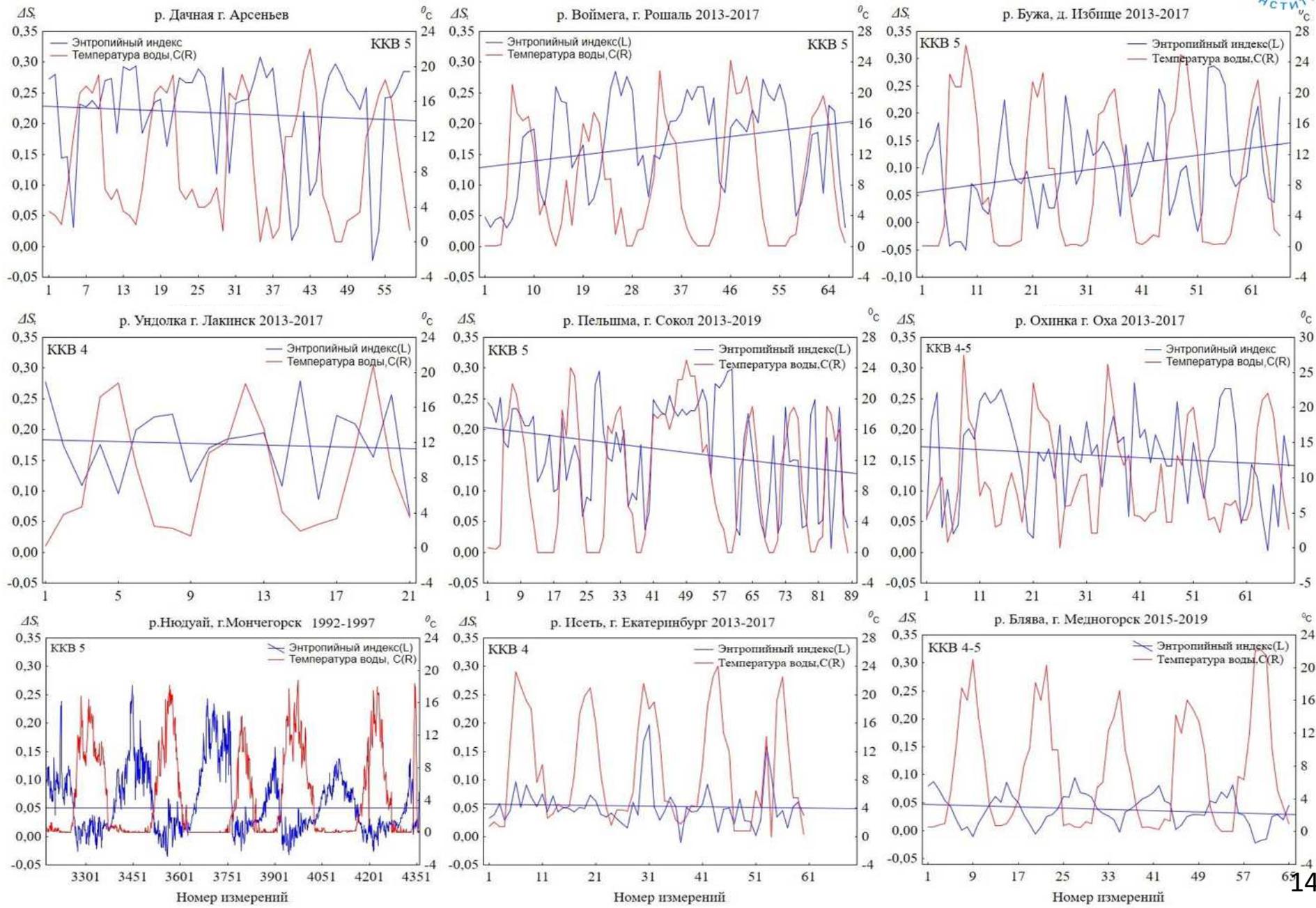
# Энтропийная оценка некоторых водных объектов: сезонная цикличность



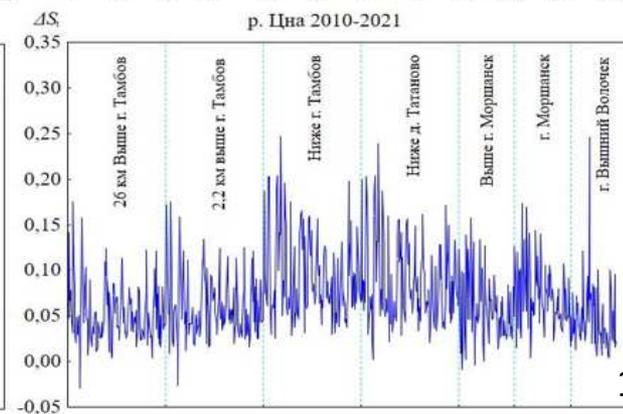
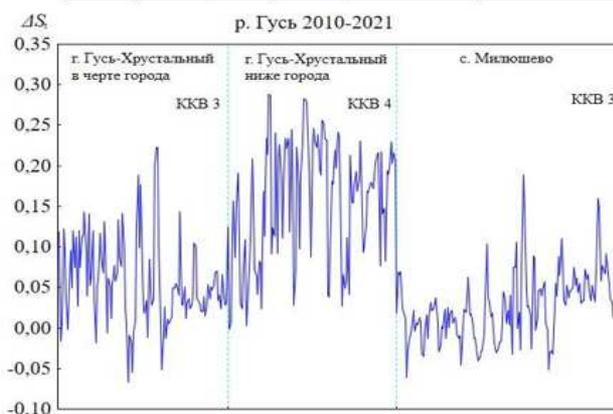
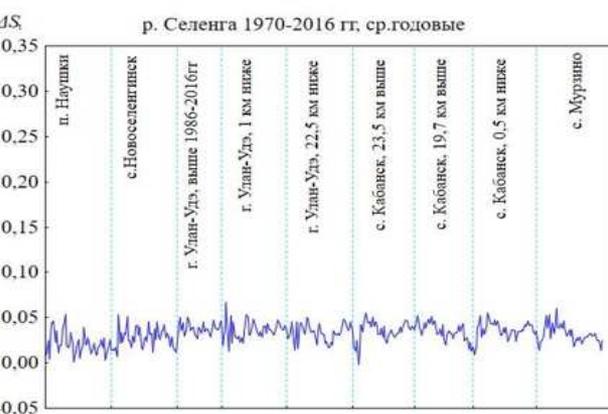
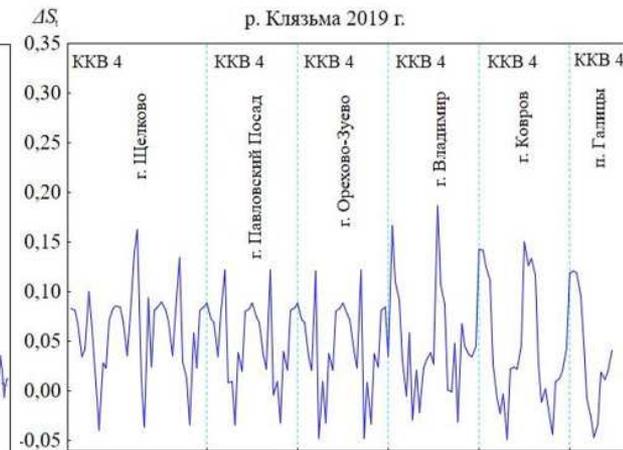
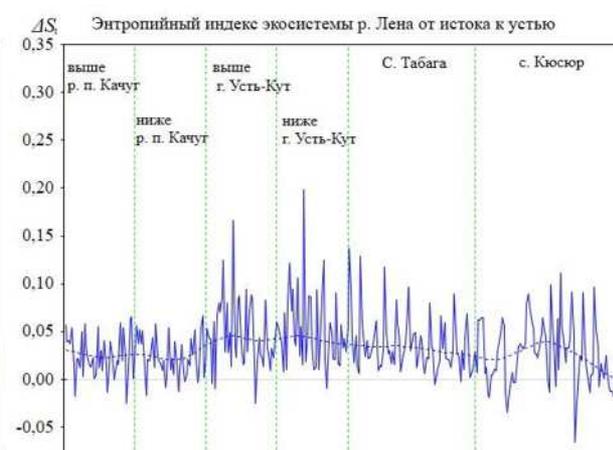
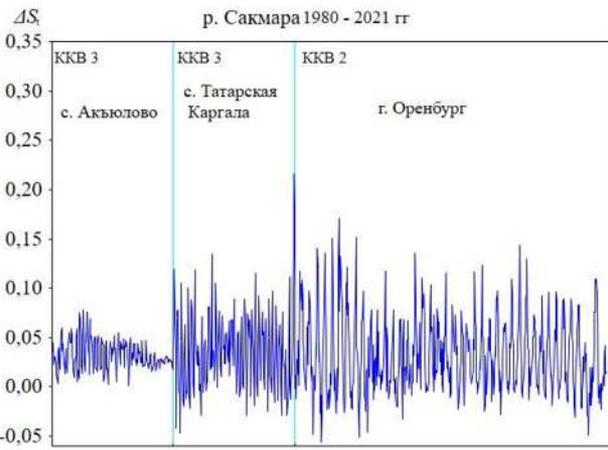
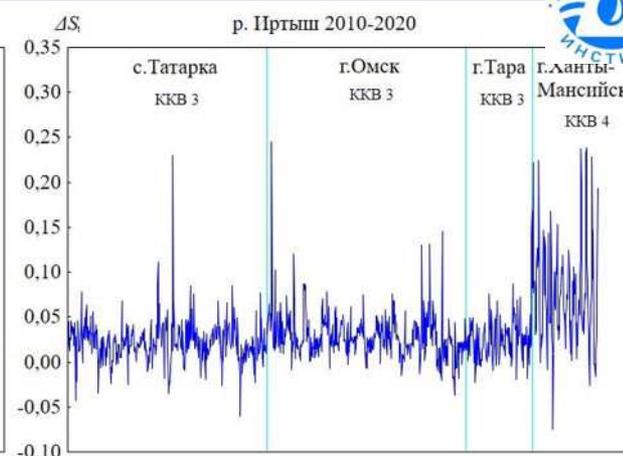
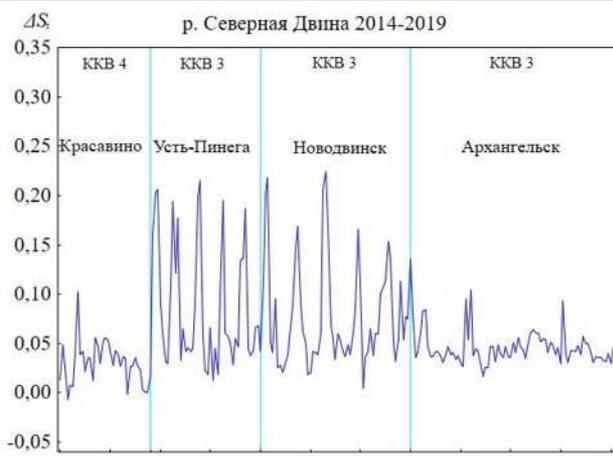
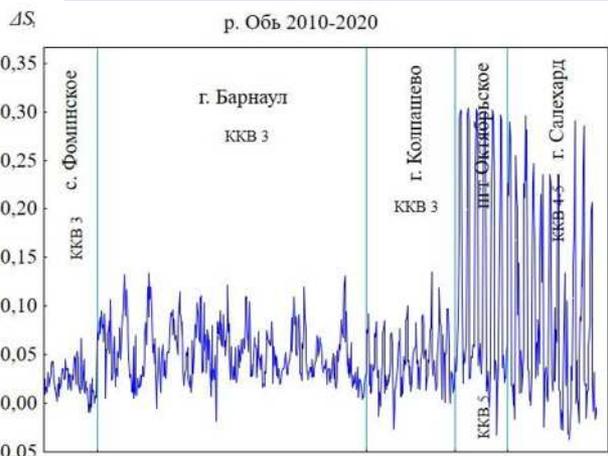
# Энтропийная оценка некоторых водных объектов: многолетние тенденции



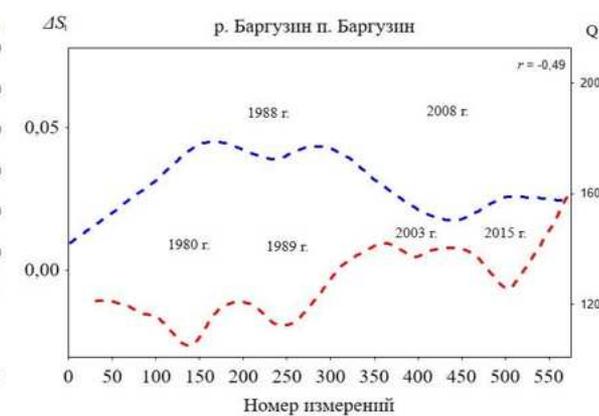
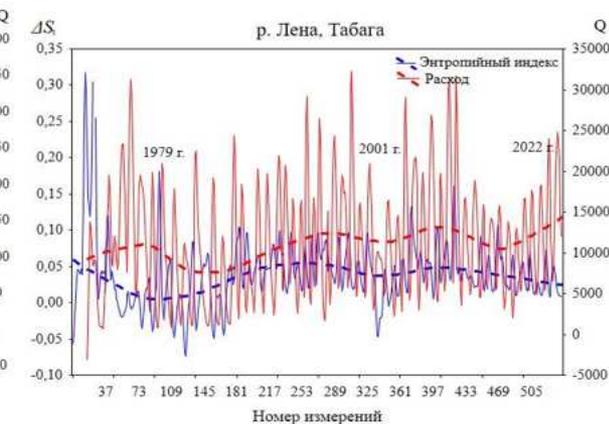
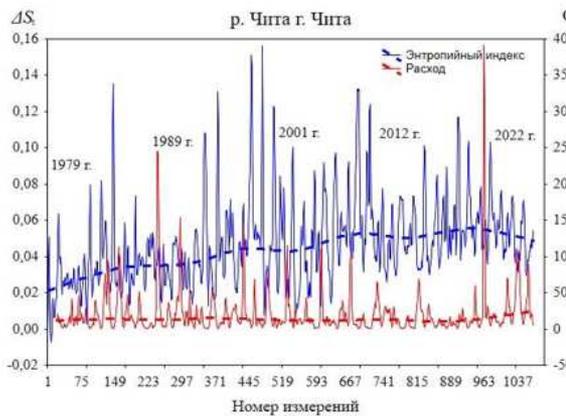
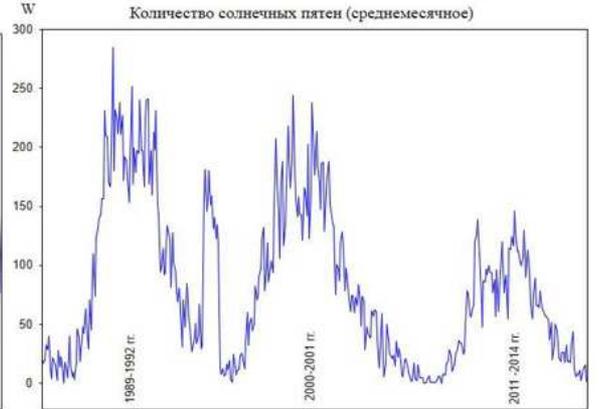
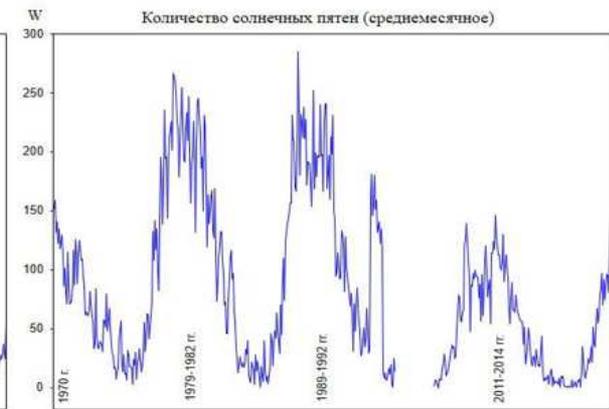
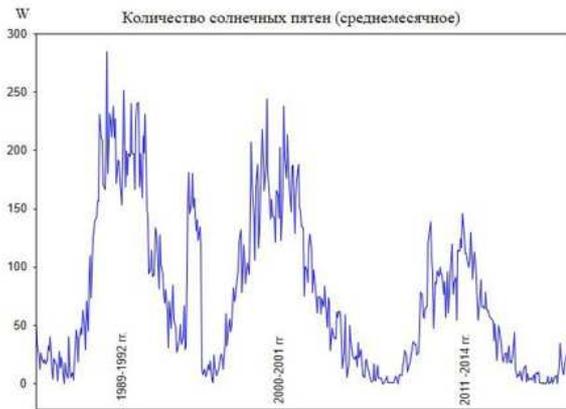
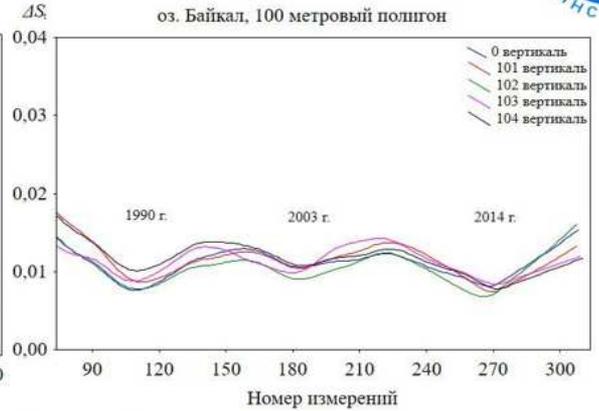
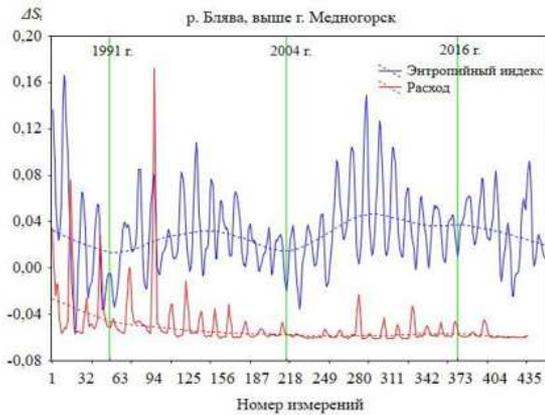
# Энтропийная оценка водных объектов с высоким уровнем загрязнения



# Энтропийная оценка водных объектов от истоков к устью



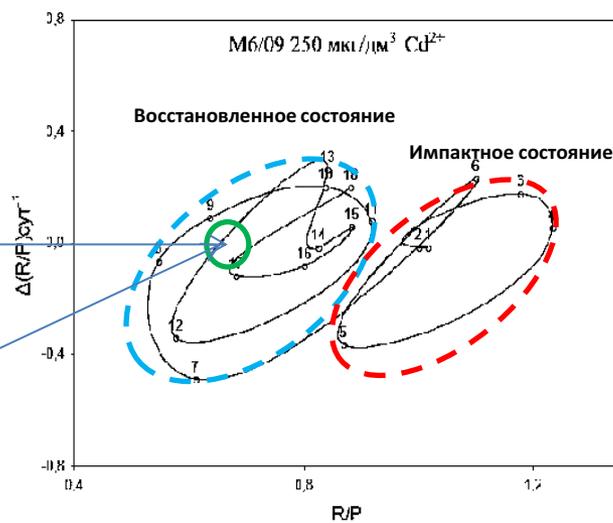
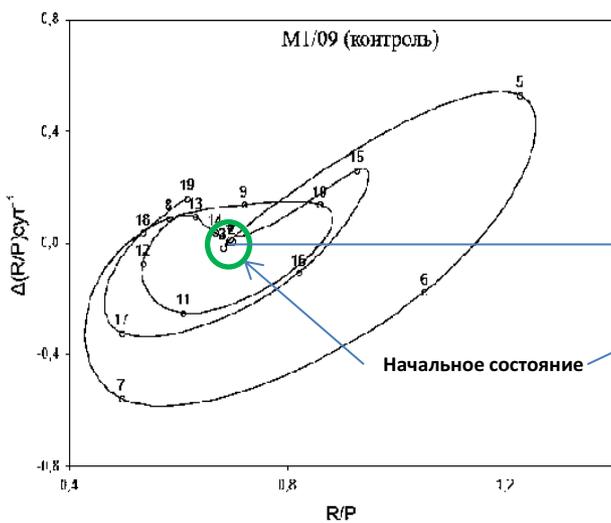
# Цикличность изменения энтропии и солнечной активности



Класс состояния	Энтропийный индекс $\Delta S_t$	Экологическое состояние
1	-0,123 – 0,062	Предельно благополучное
2	0,063 – 0,124	Благополучное
3	0,125 – 0,187	Удовлетворительное
4	0,188 – 0,249	Неблагополучное
5	0,250 – 0,312	Предельно неблагоприятное

## Бистабильность состояния.

Стационарные состояния водных экосистем вероятны в довольно узких пределах значений отношения деструкции к продукции. Области фазового пространства, лежащие в этих пределах, выступают в качестве аттракторов оптимального состояния экосистем. Возврат в эту область происходит даже после полной гибели живых компонентов экосистемы при их восстановлении.

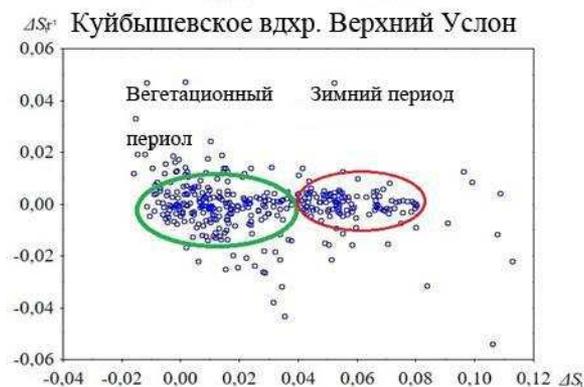
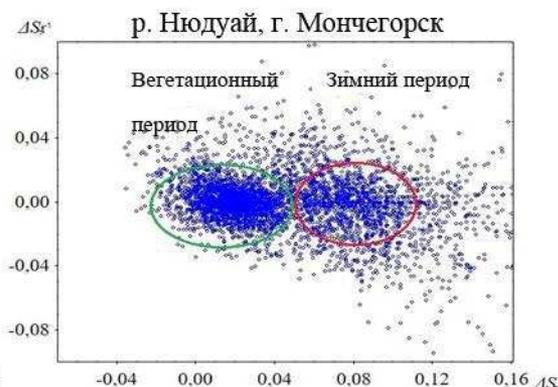
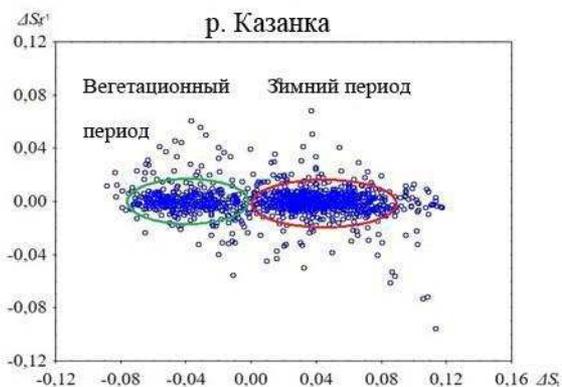


- Абстрагируя от формализованной шкалы оценки состояния экосистем по энтропийному индексу, можно говорить о четырех состояниях экосистем.

$\overline{\Delta S_t^{-1}}$	Экологическое состояние
$\overline{\Delta S_t^{-1}} = \min \rightarrow 0$ -0,123 – 0,124 *	Благополучное стационарное
$\overline{\Delta S_t^{-1}} = \min \rightarrow 0$ 0,125 - 0,312 *	Неблагополучное стационарное импактное
-0,123 – 0,312 *	Нестационарное переходное от благополучного к неблагоприятному
-0,123 – 0,312 *	Нестационарное переходное от неблагоприятного к благополучному

\* Условные численные значения

- Как проявление свойства бистабильности экосистем можно рассматривать сезонные колебания энтропийного индекса



## ***ВЫВОДЫ***

- Энтропийный индекс объективно отображает экологическое состояние водных объектов.
- Между состоянием экосистемы (уровнем благополучия) и степенью загрязненности водного объекта нет прямой связи.
- Энтропийный индекс позволяет единообразно оценивать экосистемы водных объектов независимо от их типологических особенностей.
- Энтропийный индекс может являться финальной оценкой экологического состояния водного объекта в случае благополучного состояния. Если состояние неблагоприятно – может служить основой для более детальных исследований. Такой подход может служить базой для оптимизации системы государственного мониторинга.
- Энтропийный индекс позволяет организовать оперативный мониторинг в режиме онлайн на базе автоматических станций.
- Циклический характер динамики энтропийного индекса и бистабильность состояния предполагают возможность прогнозирования состояния водных экосистем на различных временах.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ