

Международная научно-практическая конференция
«ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»
Ростов-на-Дону, 20 – 23 сентября 2023 г.



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

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

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 экологического состояния водных объектов должны основываться:

- на обобщенных термодинамических характеристиках функционирования экосистем: 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

Консервативные системы
 $dS/dt \geq 0$; $S \rightarrow \max$

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.



$S = \min$



$S = \max$

$$1) \frac{d\sigma}{dt} \leq 0, \quad 2) \sigma = \frac{T}{V} \frac{diS}{dt} \approx \dot{q} \quad 3) \dot{q} = \frac{T}{B} \frac{dQ}{dt}$$

$$4) \dot{q} = T \left(\frac{R}{P} \right) \quad 5) \frac{d\dot{q}}{dt} \leq 0 \quad 6) \bar{q} = \min \quad 7) \frac{d\bar{q}}{dt} \leq 0$$

$$\bar{\sigma} = \bar{T} \Delta \overline{(R/P)} \rightarrow \min \leq 0$$



$S = \min$



$S = \max$

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

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

- Водным экосистемам внутренне присуще функционирование с регулярной сменой режимов: стационарные состояния, характеризуемые 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**.

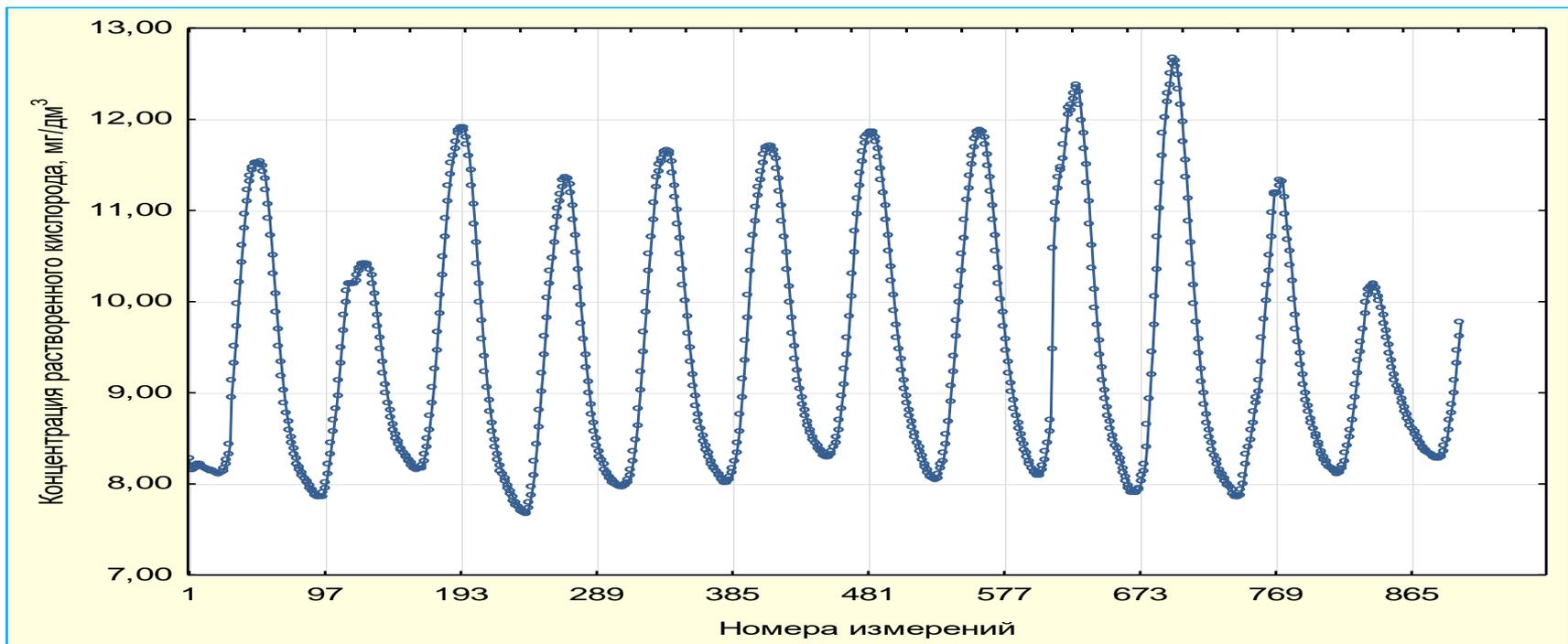
Представленные особенности функционирования водных экосистем позволяют:

- 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 суточных данных о скорости изменения энтропии.

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

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

Шкала энтропийной оценки состояния

1. Температура воды $T_1 = 273,15^\circ\text{K}$ ($0,0^\circ\text{C}$) - концентрация кислорода $C_{\text{O}_2} = 0,0$ мг/дм³ соответствует температуре $T_2 = 373,15^\circ\text{K}$ (100°C).

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

2. Температура воды $T_1 = 373,15^\circ\text{K}$ (100°C) – концентрация кислорода $C_{\text{O}_2} = 14,62$ мг/дм³ соответствует температуре $T_2 = 273,15^\circ\text{K}$ ($0,0^\circ\text{C}$).

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

2.1. Температура воды $T_1 = 309,15^\circ\text{K}$ (36°C) – концентрация кислорода $C_{\text{O}_2} = 14,62$ мг/дм³. «Равновесная» температура $T_2 = 273,15^\circ\text{K}$ ($0,0^\circ\text{C}$).

$$\Delta S_t = \ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \frac{273,15}{333,15} = -0,123 = \text{min}$$

Класс состояния	Энтропийный индекс (ΔS_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

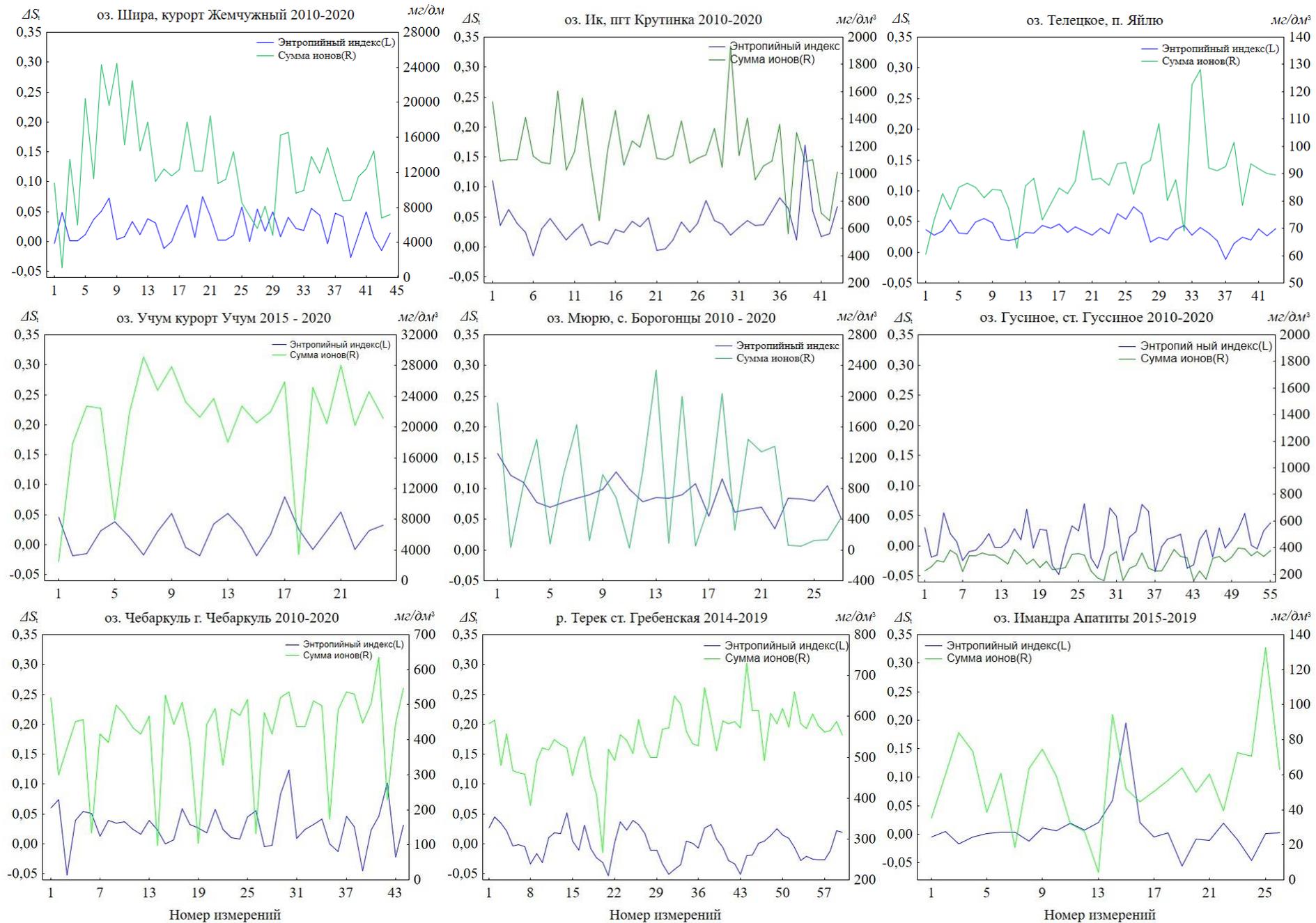
**Сравнительная оценка состояния водных объектов (средние значения
за период наблюдения; выборочные пункты)**

Водный объект	Пункт наблюдений	Класс качества по УКИЗВ	Энтропийный индекс	Класс благополучия	Сумма ионов, мг/дм ³
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

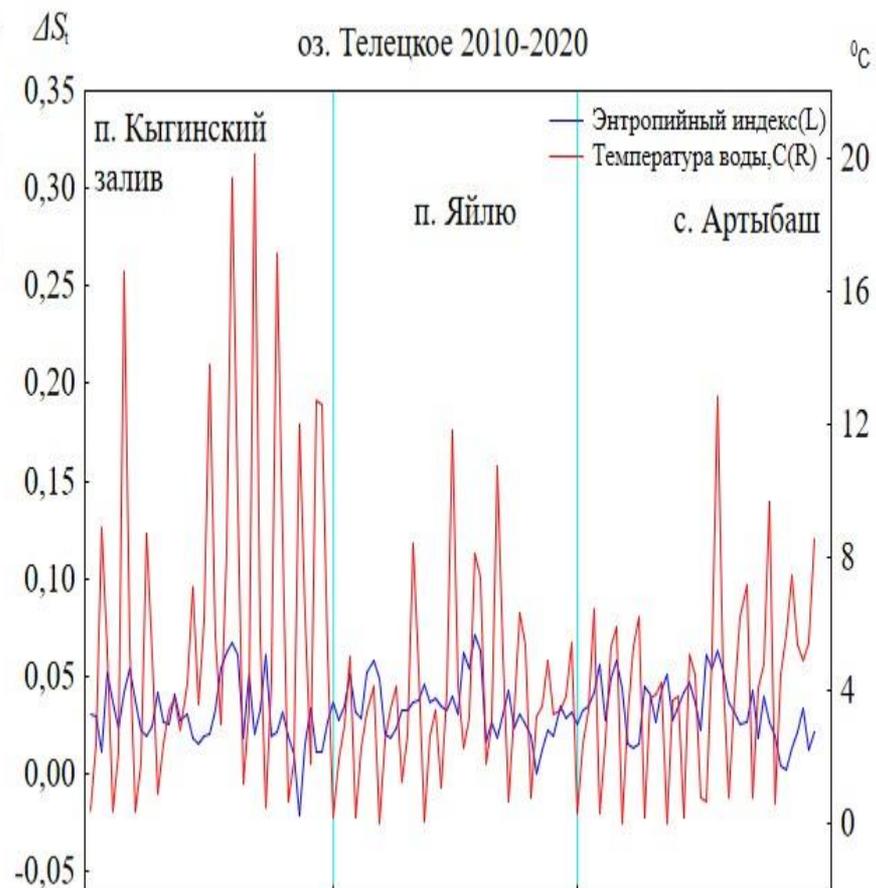
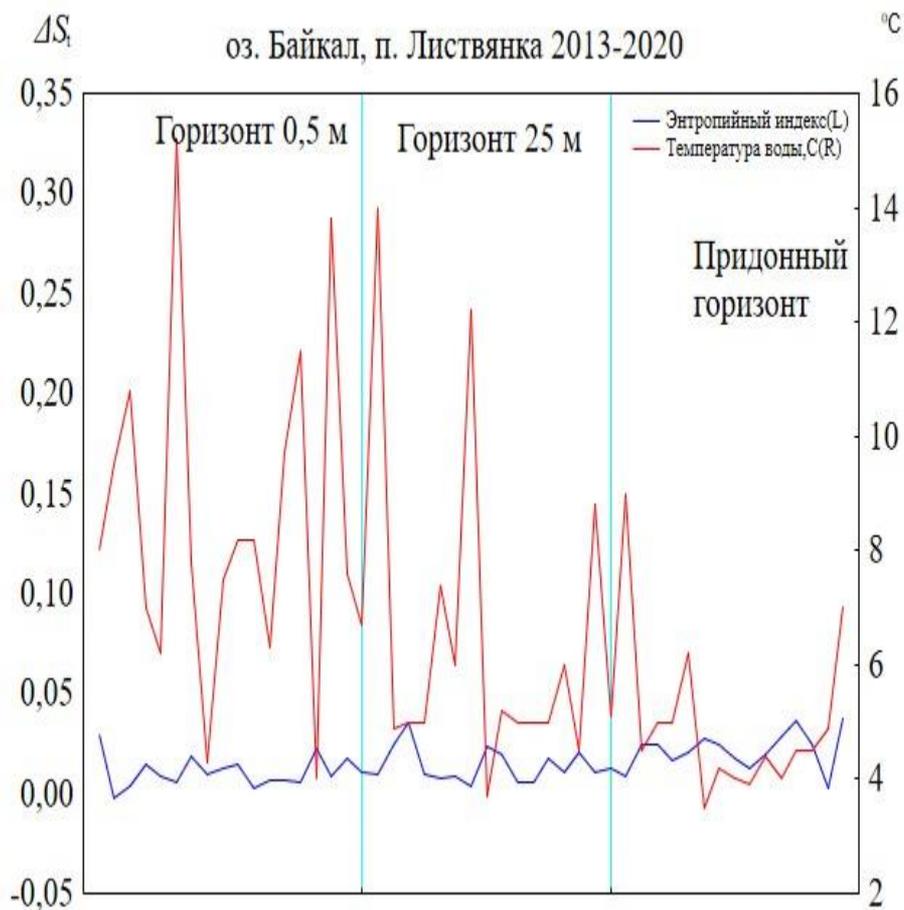
**Сравнительная оценка состояния водных объектов (средние значения
за период наблюдения; выборочные пункты)**

Водный объект	Пункт наблюдений	Класс качества по УКИЗВ	Энтропийный индекс	Класс благополучия	Сумма ионов, мг/дм ³
Зона смешанных и широколиственных лесов					
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
Лесостепная и степная зоны					
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

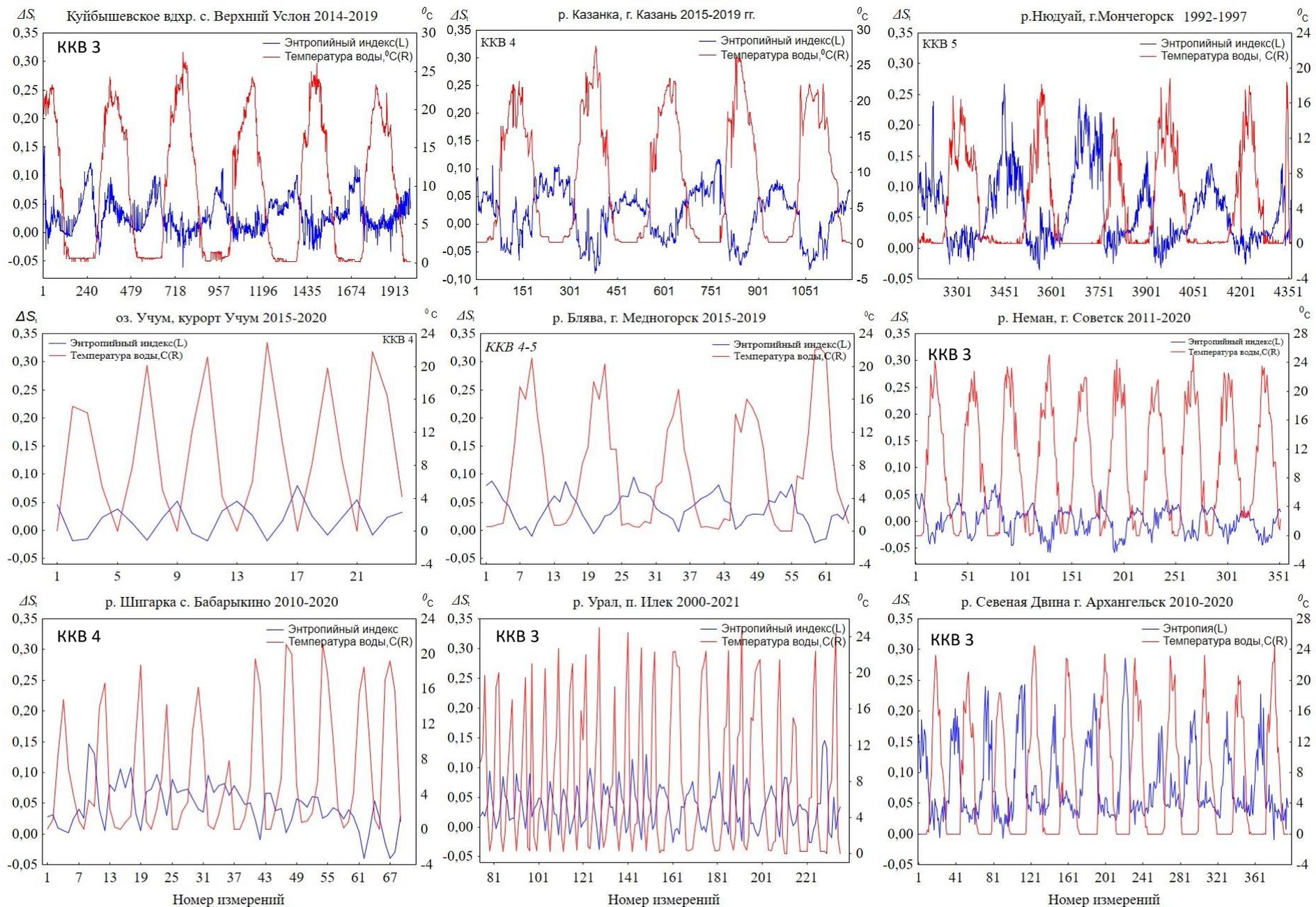
Энтропийная оценка некоторых водных объектов с различной минерализацией



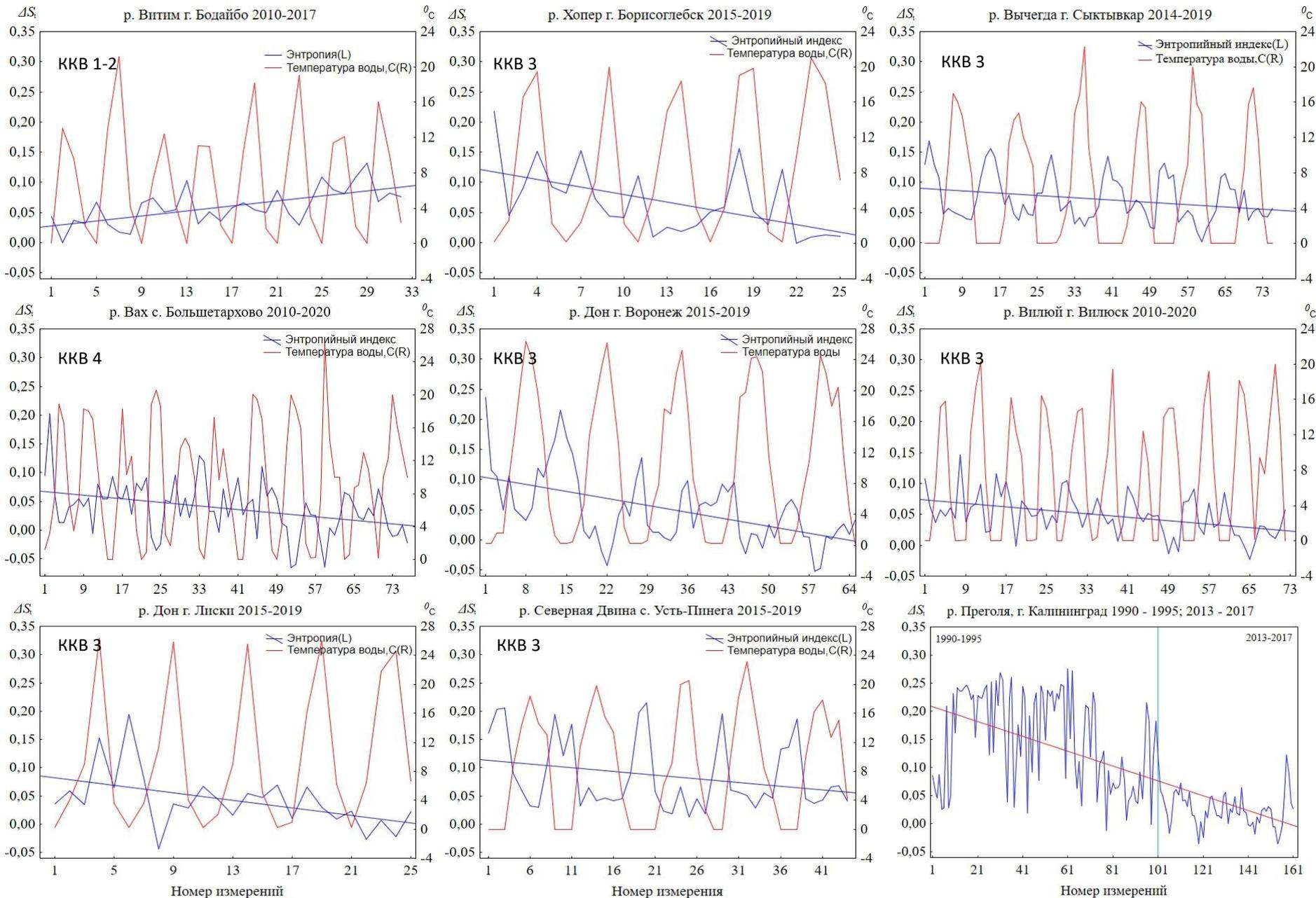
Энтропийная оценка некоторых водных объектов: пространственно-временная стабильность



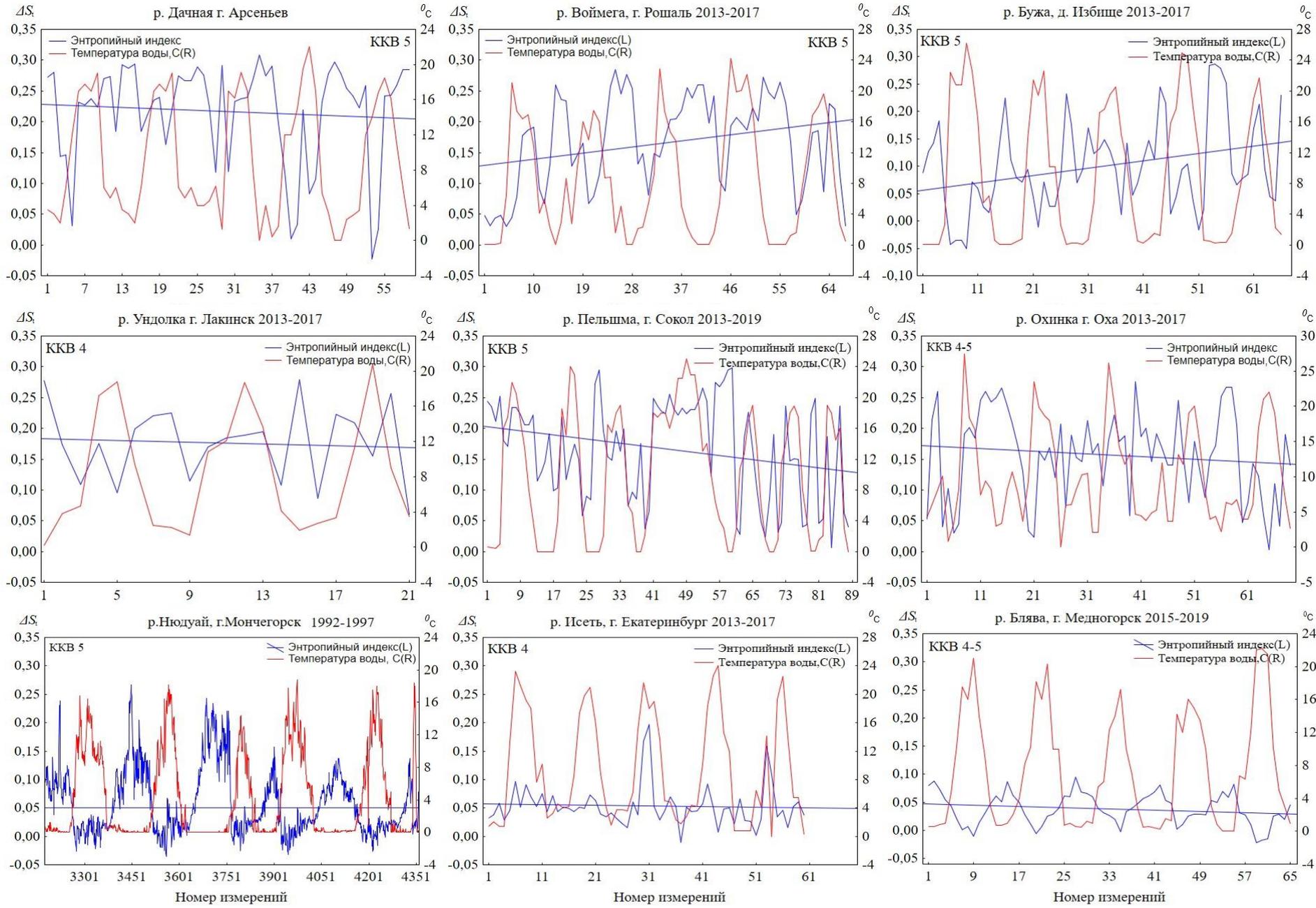
Энтропийная оценка некоторых водных объектов: сезонная цикличность



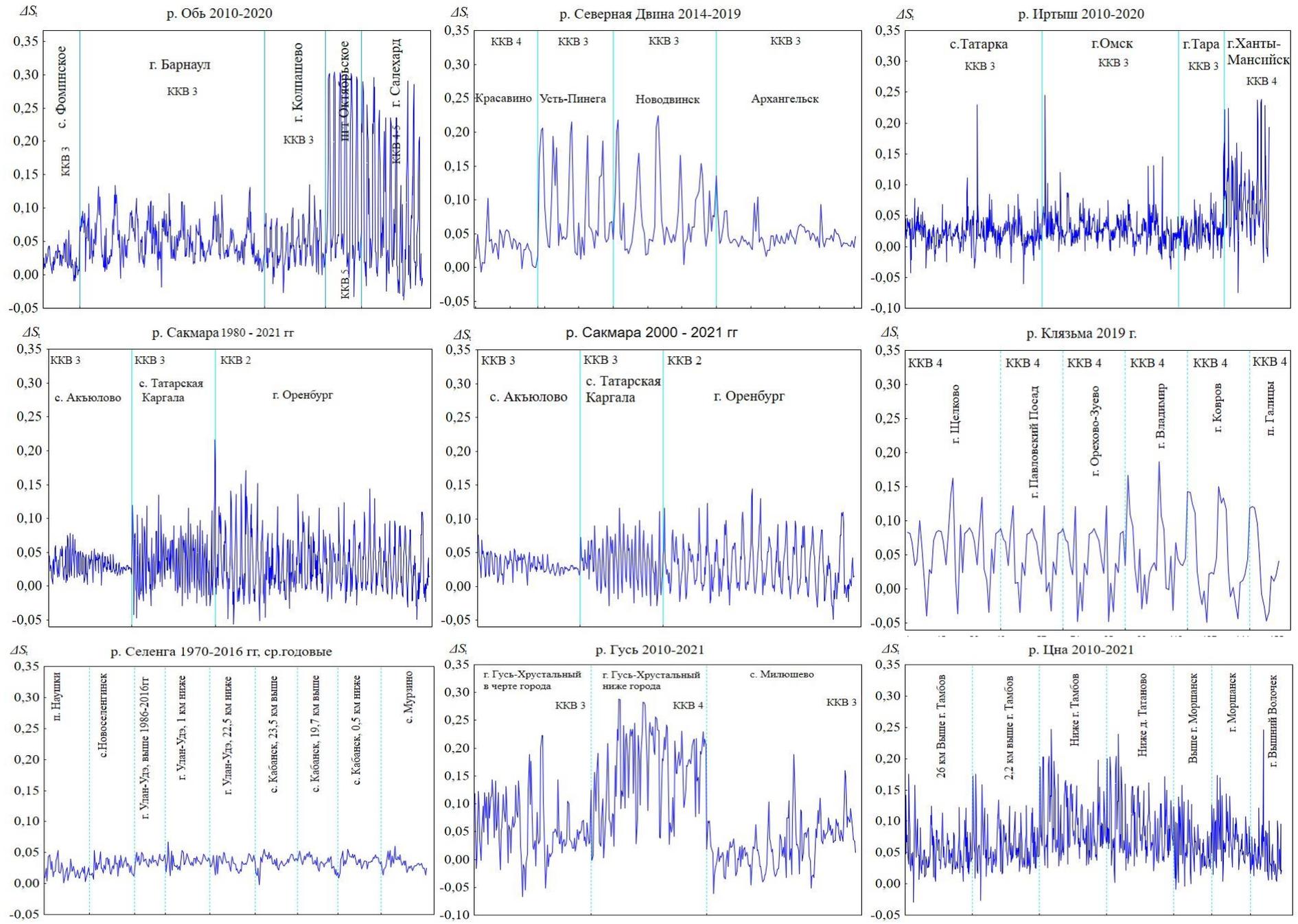
Энтропийная оценка некоторых водных объектов: многолетние тенденции



Энтропийная оценка водных объектов с высоким уровнем загрязнения

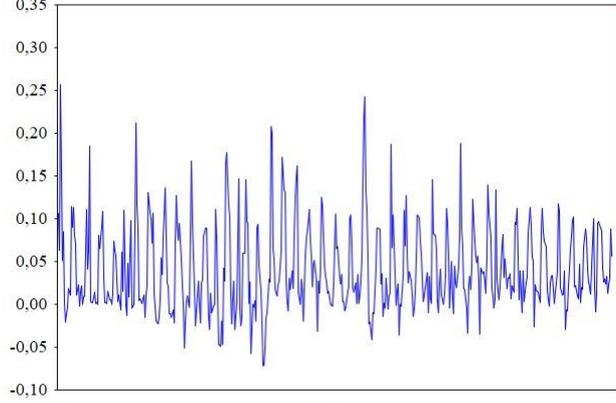


Энтропийная оценка водных объектов по длине

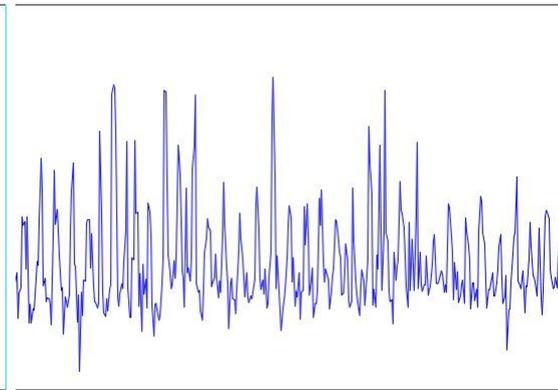


Энтропийная оценка р. Урал

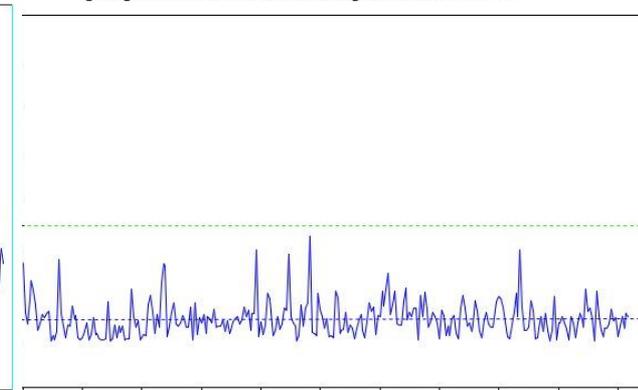
р. Урал, г. Верхнеуральск 1980 - 2021 гг



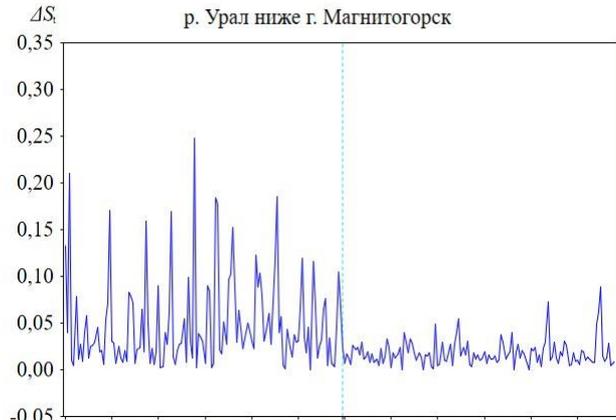
г. Верхнеуральск, ниже города



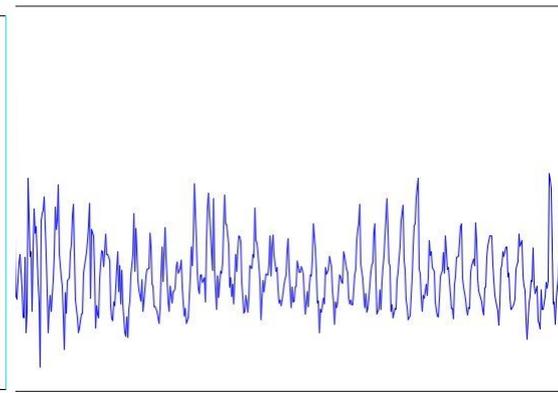
р. Урал выше г. Магнитогорск 1980-2021 гг



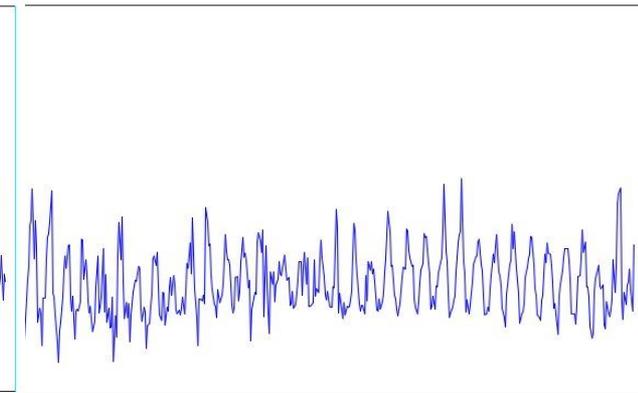
р. Урал ниже г. Магнитогорск



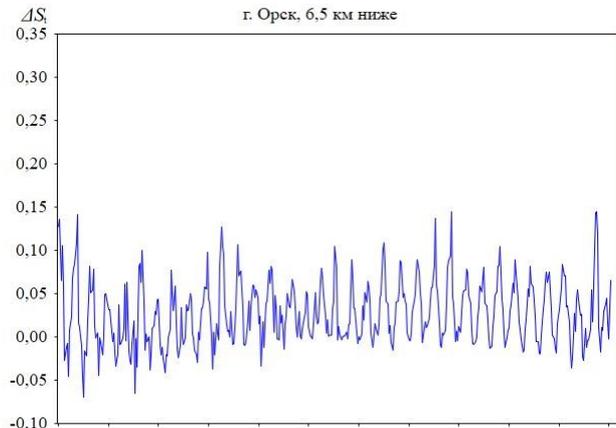
р. Урал, п. Березовский



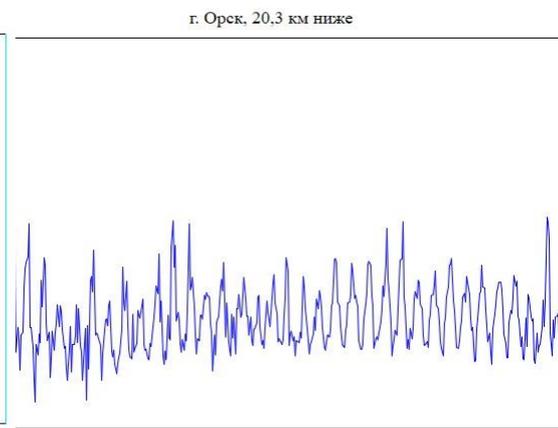
г. Орск выше города



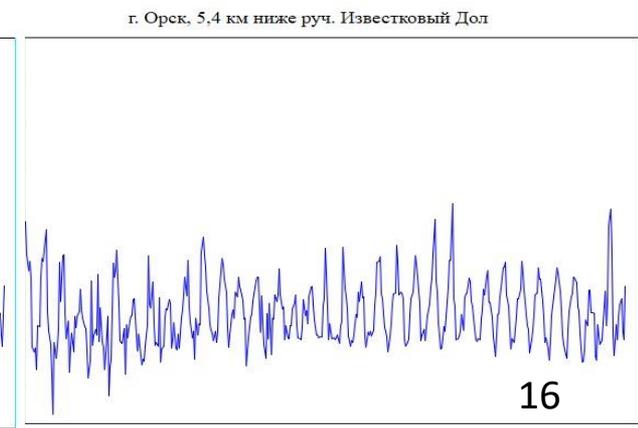
г. Орск, 6,5 км ниже



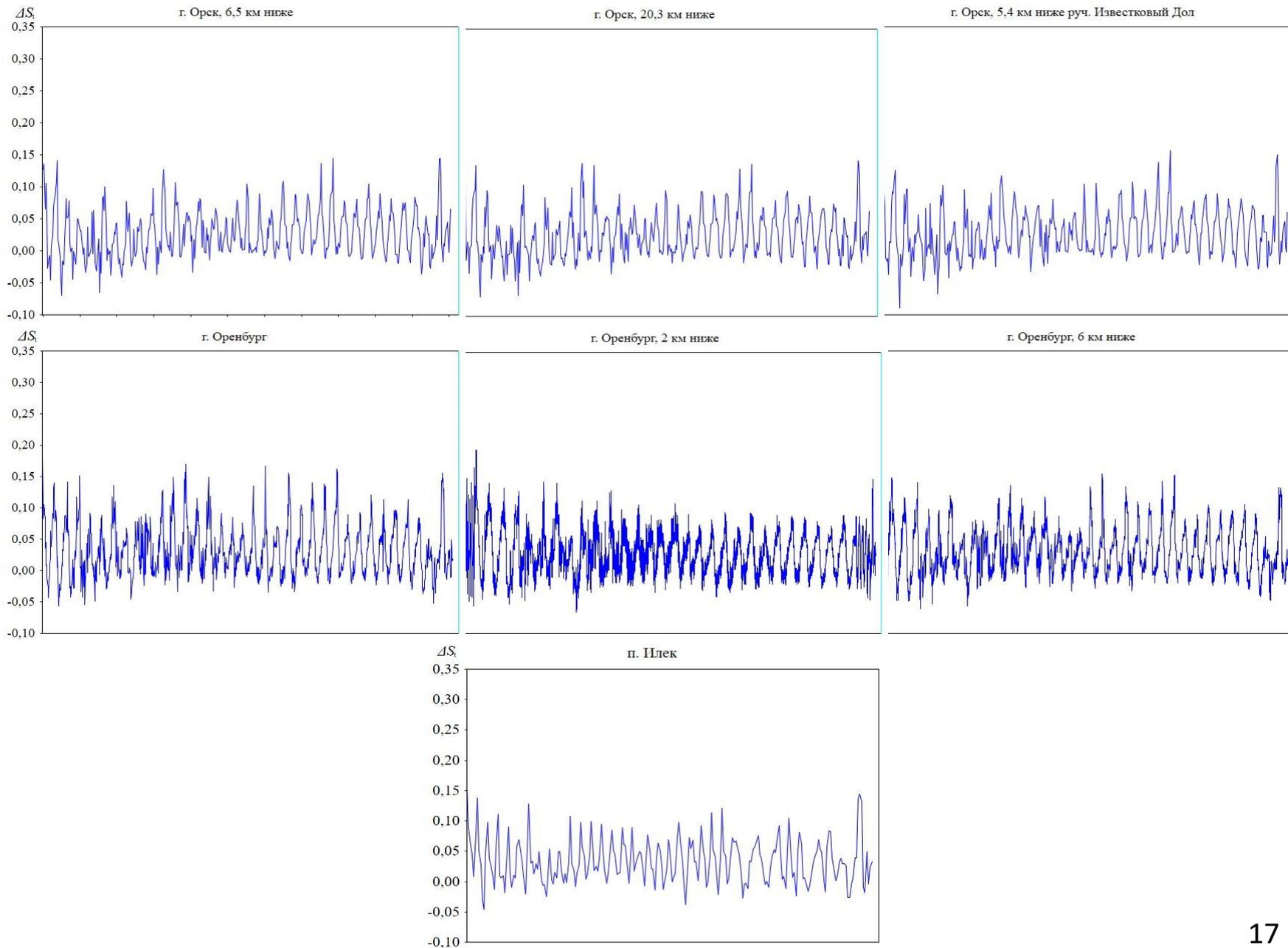
г. Орск, 20,3 км ниже



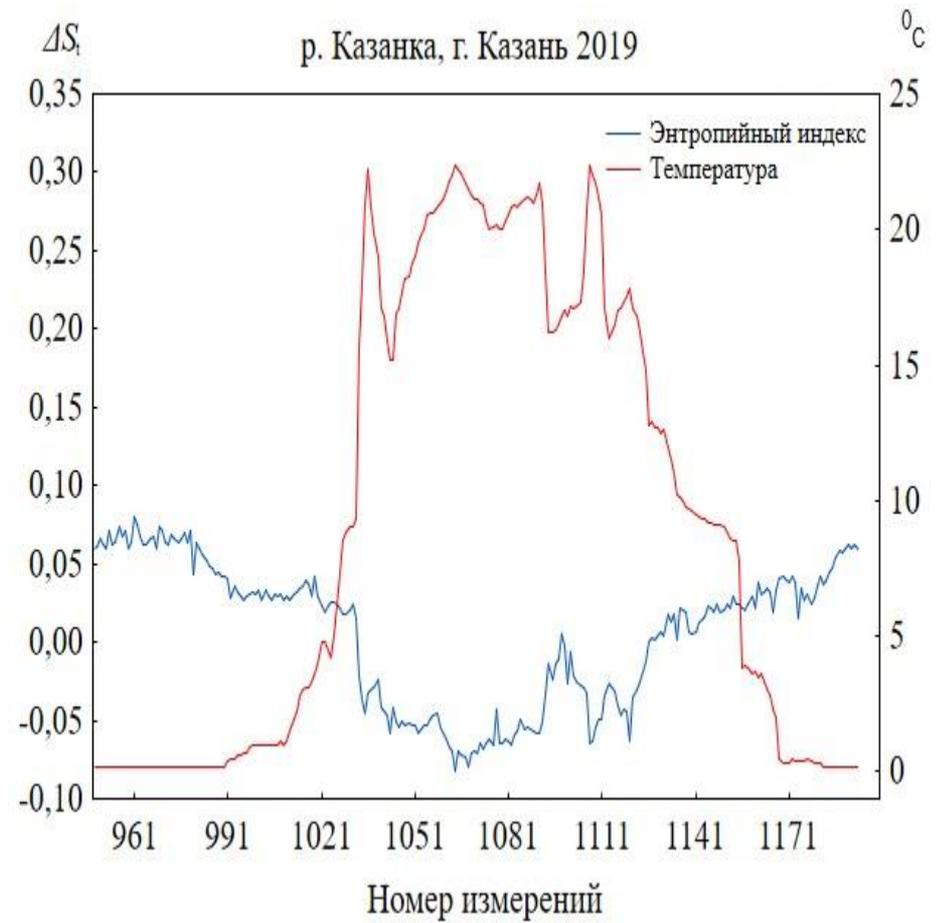
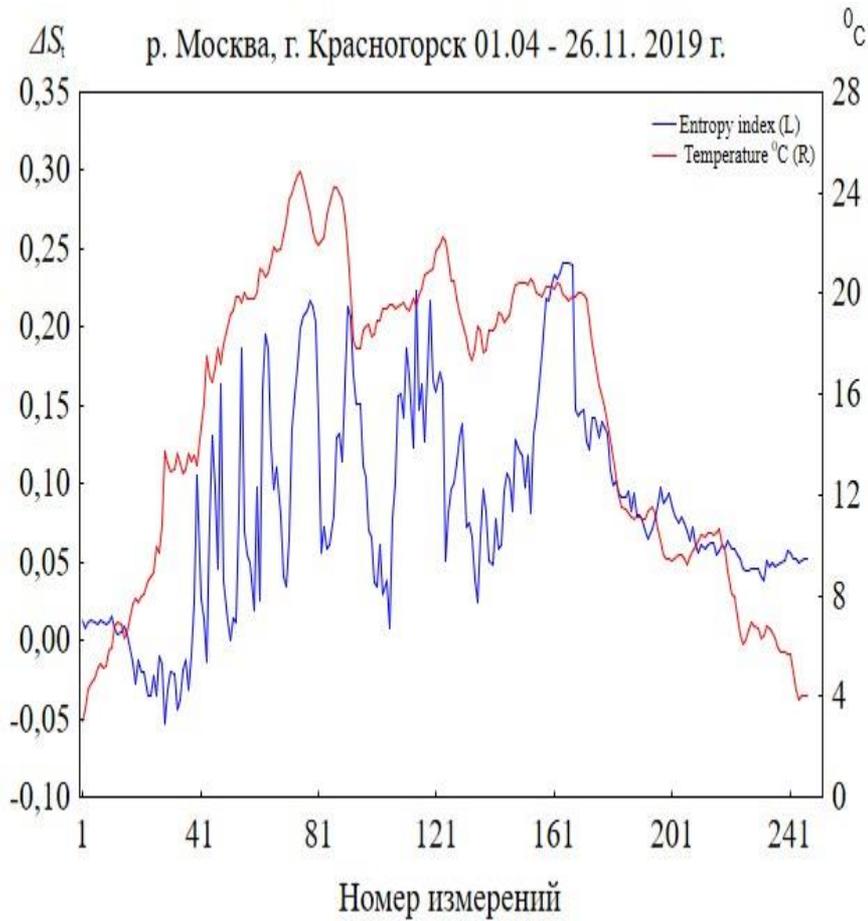
г. Орск, 5,4 км ниже руч. Известковый Дол



Энтропийная оценка р. Урал



Ежедневная динамика



ВЫВОДЫ

- Энтропийный индекс объективно отображает экологическое состояние водных объектов.
- Между состоянием экосистемы, уровнем благополучия и степенью загрязнения 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 неблагополучно – 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.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

