*УДК 577.4*

**Возможности in\_situ-технологии контроля экологического состояния водных объектов на основе биоиндикации. Часть 1. Выявление и ранжирование факторов среды, приводящих к экологическому неблагополучию**

**© 2014 г. А.П. Левич, Д.В. Рисник, Н.Г. Булгаков, П.В. Фурсова**

МГУ имени М.В.Ломоносова, биологический факультет,

119899 Москва, Воробьевы горы, д. 1, стр. 12

e-mail: apl@chronos.msu.ru

В предложенном читателю цикле статей приведены примеры использования in\_situ-технологии контроля экологического состояния для водных объектов России и сопредельных стран. In\_situ-технология предоставляет следующие возможности: 1) учет влияния особенностей отбора и обработки проб; 2) выявление групп наблюдений, однородных по отношению к факторам, не оказывающим влияния на благополучие экосистем; 3) поиск факторов, оказывающих влияние на состояние экосистем; 4) ранжирование этих факторов по частоте встречаемости случаев неблагоприятного воздействия; 5) расчет положения границ, разделяющих "благополучные" и "неблагополучные" значения биологического индикатора состояния экосистем; 6) расчет положения границ, разделяющих "допустимые" и "недопустимые" значения факторов, влияющих на состояние экосистем; 7) определение достаточности программы наблюдений для диагностики причин экологического неблагополучия; 8) диагностика причин экологического неблагополучия в отдельных пунктах наблюдений; 9) сравнение эффективности индикаторов для отражения причин неблагополучия. В первой части статьи освещены вторая, третья и четвертая из перечисленных возможностей.

*Ключевые слова*:качество вод, экологический контроль, состояние экосистем, фитопланктон, зообентос, ихтиофауна

# ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в практике использования водных объектов отсутствует понятие об объективном значении экологической нормы состояния. Границы в существующих биологических и физико-химических классификаторах качества вод, как правило, задают независимо друг от друга. Значения этих границ в той или иной степени носят экспертный или лабораторный характер. Некорректность некоторых классификаторов, в частности, обуславливает экстраполяция лабораторных экспериментов на природные объекты со сложным комплексом одновременно действующих факторов, а также подмена понятий, заключающаяся в оценке состояния водного объекта не по состоянию населяющей его биоты, а по концентрациям химических веществ.

Согласно биотической концепции контроля природной среды [1, 12, 20] оценку состояния экосистем на шкале "благополучие-неблагополучие" следует проводить не по уровням абиотических факторов, а по биологическим индикаторам. Этот подход реализует используемый в настоящей работе метод установления локальных экологических норм (**метод ЛЭН**) [13–16, 18, 19].

In\_situ-технология включает: 1) методологию; 2) метод ЛЭН; 3) программное обеспечение, реализующее метод ЛЭН [5]; 4) сопутствующие методы.

Возможности метода ЛЭН: 1) на основе биотических оценок экологического состояния водных экосистем провести экологическую диагностику, т.е. составить список факторов, существенно влияющих на состояние биоты [25-27]; 2) упорядочить этот список по частоте случаев неблагоприятного воздействия; 3) провести градуировку биоиндикаторов, т.е. рассчитать границы нормы индикаторов (**ГНИ**), разделяющие их "благополучные" и "неблагополучные" значения; 4) провести градуировку факторов среды, т.е. вычислить границы нормы факторов (**ГНФ**) – границы, разделяющие "допустимые" и "недопустимые" значения для существенных физико-химических факторов [28]; 5) определить достаточность программы наблюдений за потенциальными причинами экологического неблагополучия.

Возможности сопутствующих методов: 1) учесть влияние особенностей отбора и обработки проб; 2) выявить группы однородности по отношению к причинам, не оказывающим воздействия на качество среды; 3) определить причины экологического неблагополучия на отдельных створах наблюдений; 4) сравнить эффективность индикаторов для отражения причин неблагополучия.

В первой части цикла статей проиллюстрированы первый и второй пункты из возможностей метода ЛЭН и второй пункт из возможностей сопутствующих методов. Во второй части цикла – четвертый пункт из возможностей метода ЛЭН. В третьей части цикла – все оставшиеся пункты из возможностей метода ЛЭН и сопутствующих методов.

В данной работе для биоиндикации качества вод испытаны: 1) интегральные показатели состояния сообществ фитопланктона, зоопланктона, перифитона (водная толща) и интегральные показатели состояния зообентоса (придонный слой). Эти показатели представляют собой значения по 5-балльной шкале качества вод Роскомгидромета, в которой определенному диапазону показателей присвоен класс качества от 1 до 5 [7]; 2) показатели видового разнообразия; 3) средний объем клеток фитопланктона; 4) численность и биомасса отделов зообентоса; 5) показатели уловов и урожайностей промысловых рыб; 6) показатели флуоресценции фитопланктона.

Из перечисленных показателей наиболее трудоемки в определении интегральные показатели классов качества вод и показатели, характеризующие состояние зообентоса (в силу необходимости высокой биологической квалификации исполнителей при определении систематической принадлежности видов и подсчете их численностей). Преимущество применения показателей видового разнообразия заключается, в том, что для их вычисления необходим только подсчет численностей видов без определения их видовой принадлежности. Наиболее перспективны для инструментального мониторинга состояния среды в режиме реального времени методы определения показателей флуоресценции и среднего объема клеток, т.к. эти методы могут быть полностью автоматизированы.

# МАТЕРИАЛЫ

Одним из массивов для применения in\_situ-технологии послужили данные по среднегодовым значениям гидробиологических и физико-химических характеристик в семи бассейнах крупнейших рек Европы (бассейн Западной Двины; бассейн Немана; бассейн Дуная; бассейн Днестра; бассейн Днепра; бассейн Волги; бассейн Нижнего Дона) и пяти бассейнах рек азиатской части России и Узбекистана (бассейн Оби; бассейн Енисея; бассейн Лены; бассейн Амура; бассейн Сырдарьи) [21, 22]. Бассейн Оби был разделен на два подбассейна (район Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса (**КАТЭК**) и подбассейн Иртыша), бассейн Енисея – на три подбассейна (район Забайкалья, подбассейны Ангары и Верхнего Енисея), бассейн Амура – на два подбассейна (Амура без Уссури и Уссури).

Исходные гидробиологические данные включали в себя сведения о численности и биомассе фито-, зоопланктона, перифитона и зообентоса [7]. Оценку класса качества вод проводили отдельно для толщи воды (по показателям индексов сапробности фито- и зоопланктона, перифитона) и для грунтов (по показателям олигохетных и биотических индексов зообентоса). В качестве абиотических факторов исследовали среднегодовые значения следующих показателей: биологического потребления кислорода за 5 суток (БПК5); химического потребления кислорода (ХПК), pH; концентраций растворенного кислорода (O2), азота нитратного (NO3), нитритного (NO2) и аммонийного (NH4), общего фосфора (Pобщ), цинка (Zn), железа (Fe2+), меди (Cu), никеля (Ni), ртути (Hg), свинца (Pb), хрома (Cr), кадмия (Cd), магния (Mg), кальция (Ca), алюминия (Al), нефтепродуктов, фенолов, летучих фенолов, синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), сероводорода (H2S), метилмеркаптана, формальдегида, лигнина, лигносульфоната, α-гексахлорана, γ-гексахлорана, ксантогенатов, роданидов, цианидов, мышьяка, взвешенных веществ, линдана, метанола, дихлордифенил трихлорметилметан (ДДТ), дихлордифенил дихлорметилметан (ДДД), дихлордифенил дихлороэтилен (ДДЭ), натрия (Na), сульфатов (SO4), хлоридов (Cl), фторидов (F), бора (B), пропанида, сатурна; минерализации; суммы ионов; водности; температуры [6, 8, 9]. Из-за региональных особенностей программ физико-химического мониторинга списки анализируемых физико-химических характеристик различались в зависимости от бассейна как по количеству, так и по составу переменных. Для температуры и водности здесь и далее использовали относительные величины в виде отношения абсолютного значения переменной к среднемноголетнему для данного створа значению. Представление именно этих характеристик в виде относительных величин объясняется их явной "створоспецифичностью".

Вторым массивом для анализа послужили данные по видовому разнообразию сообществ фитопланктона Нижнего Дона [17] и Нижней Волги [18]. Для Нижней Волги также был проведен анализ данных по среднему объему клеток. В исследовании использованы данные государственного мониторинга поверхностных вод России по численности фитопланктона и физико-химическим факторам на створах Нижнего Дона и Нижней Волги за 1978–2009 гг. [24]. Показатели физико-химического мониторинга, использованные в анализе, включали: БПК5, концентрации суммы ионов натрия и калия (Na+K), железа общего (Feобщ), концентрации растворенного кислорода (O2), взвешенных веществ, азота нитратного (NO3), нитритного (NO2), аммонийного (NH4), азота суммарного минерального, ДДТ, кремния кремнекислоты, фосфора фосфатов (PO4), углекислого газа (CO2), фенолов, гидрокарбонатного аниона (HCO3), нефтепродуктов, сульфатов (SO4), суммы ионов, меди (Cu), цинка (Zn), ртути (Hg); величину насыщения кислородом; рН; цветность; водность; окисляемость бихроматную; температуру; жесткость, прозрачность.

Третьим массивом для анализа, характеризующим сообщество зообентоса, послужили данные по серии водоемов Ханты-Мансийского автономного округа [4], испытывающих антропогенное воздействие предприятий нефтегазового комплекса. Обследовали серию водоемов: в 2006 г. – озера 101 и 102 и реку 103, в 2011 г. – озера 1, 2, 3, 4, 5, 105, 106, 107 и реку 108, в 2012 г. – озера 101, 109, 110, 111, 112, реку 103. В работе были использованы данные по: 1) по общей численности (экз./м2) и биомассе (мг/м2) макрозообентоса; 2) по численности (экз./м2) и биомассе (мг/м2) отдельных таксонов макрозообентоса (Chironomidae, Hirudinea, Mollusca, Nematoda, Oligochaeta, Ceratopogonidae). В качестве физико-химических показателей исследовали: содержание в донных отложениях нефтепродуктов (мг/кг); полиароматических углеводородов (ПАУ) (мг/кг) – нафталина, флуорена+аценафтена, фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз(a)антрацена, хризена, бенз(b)флуорантена, бенз(k)флуорантена, бенз(a)пирена, дибенз(a,h)антрацена, бен(g,h,i)перилена; содержание *н*-алканов (мг/кг) (только в 2006 г.); содержание летучих органических соединений (ЛОС) (мг/кг); содержание тяжелых металлов (мг/л) – мышьяка (As), кадмия (Cd), ртути (Hg), селена (Se), свинца (Pb), цинка (Zn), кобальта (Co), хрома (Cr), меди (Cu), молибдена (Mo), никеля (Ni), сурьмы (Sb).

В качестве четвертого массива для анализа были использованы данные по уловам леща, чехони и судака совместно с бершом в четырех водохранилищах: Цимлянском, Веселовском, Пролетарском и Усть-Манычском [3]. Кроме того, на основе урожайности сеголетков полупроходного леща и годовиков проходного осетра с 1975 по 1990 гг. проведен анализ данных Нижнего Дона. В качестве физико-химических факторов использованы следующие характеристики: концентрации азота нитратного (NO3), нитритного (NO2), аммонийного (NH4), нефтепродуктов, фенолов, СПАВ, меди (Cu), цинка (Zn), взвешенных веществ, кальция (Ca), магния (Mg), хлора (Cl), фосфора фосфатов (PO4), железа (Feобщ), марганца (Mn), сульфатов (SO4), гексахлорана (α-гексахлоран и γ-гексахлоран), ДДЭ, ДДТ, ДДД, растворенного кислорода (O2), а также величины БПК5, ХПК, pH, минерализации, водности, температуры воды.

Текущее состояние ихтиологических характеристик может зависеть не только от современного состояния среды, но и от предшествующих состояний. Для учета этой зависимости анализировали влияние на уловы данного года значений абиотических переменных в предыдущие годы. Для уловов судака с бершом, леща и чехони в расчет принимали данные за шесть лет, поскольку основную массу уловов составляли особи от сеголеток до шестилеток. Для урожайности леща и осетра учитывали влияние на молодь факторов первой половины текущего года (или среднесезонные характеристики факторов).

Пятым массивом для анализа послужили данные по флуоресценции фитопланктона Рыбинского водохранилища в июне-августе 2010 года [2]. В качестве показателей флуоресценции в анализе использовали: $F\_{0}$ – фоновый уровень переменной флуоресценции пробы (все реакционные центры фотосистемы 2, возбуждаемой светом в коротковолновой части спектра, находятся в "открытом" состоянии); $F\_{m}$ – максимальный уровень переменной флуоресценции пробы (все реакционные центры фотосистемы 2 находятся в "закрытом" состоянии); $F\_{орг}$ – уровень флуоресценции растворенных органических веществ. В качестве физико-химических факторов исследовали: концентрации кальция (Ca), магния (Mg), натрия (Na), калия (K), хлора (Cl), сульфатов (SO4), гидрокарбонатов (HCO3), азота нитратного (NO3), нитритного (NO2), аммонийного (NH4), фосфора фосфатов (PO4), суммы ионов, общего азота (Nобщ), общего фосфора (Pобщ), органического углерода во взвеси, нефтепродуктов, величины БПК5, ХПК, pH, щелочности, температуры воды и воздуха, электропроводности, прозрачности, цветности.

# МЕТОДЫ

## Методы расчета индикаторных показателей

* + 1. Интегральный показатель качества вод для оценки состояния сообществ фитопланктона, зоопланктона, перифитона, зообентоса взят из Ежегодников качества вод (по гидробиологическим показателям) Росгидромета [7]
		2. Расчет показателей видового разнообразия
1. Параметры ранговых распределений численностей видов в пробе

Для расчета параметров ранговых распределений виды в пробе упорядочивали по убыванию численности. Виду с максимальной численностью присваивали 1-й ранг, следующему по численности виду 2-ой ранг и т.д., виду с минимальной численностью присваивали ранг *w*, где *w* – число видов в пробе. Полученную зависимость численности от ранга аппроксимировали экспоненциальной или гиперболической моделью ранговых распределений. Параметры выбранной модели использовали в качестве биоиндикационных показателей. Экспоненциальная модель рангового распределения численностей видов Мотомуры [29], описывает численности функцией $n\_{i}=n\_{1}z^{i-1}$, где $n\_{i}$ – численность клеток вида ранга *i*, $z $– параметр модели. Гиперболическая модель [10, 11] описывает значения численностей функцией$ n\_{i}=n\_{1}/i^{β}$*,* где $β$ – параметр модели. Параметры были рассчитаны на основании распределения $k$ доминирующих в пробе видов ($z\_{k}$ и $β\_{k}$).

1. Индексы выравненности

Индексы выравненности [17] определяли по формуле: $e\_{k}=1-\left(\frac{\sum\_{i=1}^{k}n\_{i}}{N}\right)$, где *N* – общее число клеток в пробе, *k* – число доминирующих видов, используемых в анализе.

* + 1. Расчет среднего объема клеток в пробе

Средний объем клеток в пробе определяли по формуле: $\overbar{v}=\frac{B\_{общ}}{ρN\_{общ}}$, где $B\_{общ}$ и $N\_{общ}$ – соответственно суммарная биомасса и суммарная численность фитопланктона в пробе, $ ρ$ – плотность клеток (принята равной 1 г/см3).

* + 1. Расчет показателей улова и урожайности промысловых рыб

Все величины уловов и урожайностей классифицировали по 3-балльной шкале [3]. Величины уловов, входящие в интервал от минимальной величины до средней между минимальной и среднемноголетней величинами, оценивали баллом 3; уловы из интервала от средней между максимальной и среднемноголетней величинами до максимальной величины – баллом 1; оставшиеся величины оценивали баллом 2. Поскольку оценки уловов и урожайности выведены не постворно, а для всего подбассейна (отдельного водохранилища или Нижнего Дона), для комплементарности биотических и абиотических показателей полученные значения баллов экстраполировали на все створы данного подбассейна.

* + 1. Расчет показателей флуоресценции фитопланктона

На основании исходных данных были рассчитаны следующие показатели флуоресценции: $F\_{0 фито}=F\_{0}-F\_{орг}$ – фоновый уровень переменной флуоресценции фитопланктона, где $F\_{0}$ – фоновый уровень переменной флуоресценции пробы, $F\_{орг}$ – уровень флуоресценции растворенных органических веществ; $F\_{m фито}=F\_{m}-F\_{орг}$ – максимальный уровень переменной флуоресценции фитопланктона, где $F\_{m}$ – максимальный уровень переменной флуоресценции пробы.

## Метод учета факторов, не оказывающих воздействия на экологическое благополучие экосистем

С помощью метода ЛЭН градуировку факторов окружающей среды, способных привести к экологическому неблагополучию, проводят в группах наблюдений, однородных по отношению к влиянию факторов, которые не оказывают негативное действие на состояние экосистемы, но могут влиять на биоиндикационные показатели (например, географическое положение, сезон года, глубина отбора проб). Так, достаточно обширную природную территорию (например, водосборный бассейн крупной реки) делят на несколько составных частей (например, подбассейнов) и для них процедуру градуировки ведут отдельно. Соблюдение принципа однородности необходимо также вследствие вероятных различий в степени адаптированности гидробионтов к неблагоприятным воздействиям между составляющими бассейн экосистемами. Среди факторов среды, которые потенциально могут влиять на значения биоиндикаторов, можно выделить два различных по отношению к экологическому качеству среды типа. Первый из них – "активные" факторы, которые связаны с качеством среды, например, химические вещества, температура, гидрологический режим. Второй тип – "пассивные" факторы, например географическое положение или горизонт станции отбора проб, сезон года, которые влияют на значения биоиндикатора, но не влияют на качество среды. По отношению к пассивным факторам все наблюдения следует разделить на несколько групп, причем каждая группа должна включать наблюдения, однородные (условно – одинаковые) по отношению к действию пассивного фактора. Например, весенние, летние и осенние наблюдения; или пробы, отобранные с определенного горизонта. Если средние значения индикатора в группах статистически значимо различны, то влияние активных факторов на индикатор качества среды следует исследовать отдельно внутри каждой выделенной группы. Найденные методом ЛЭН положения границ классов качества (границ между градациями экологического благополучия или допустимости) в таких группах будут различны и для биологических, и для физико-химических характеристик. Т.е. границы классов качества могут оказаться различными, например, весной и летом, в водоемах и водотоках, в различных подбассейнах и т.п.

Для сравнения групп однородности был использован *U*-параметр Манна-Уитни как непараметрический метод статистического анализа, не требующий выполнения нормального закона для распределения характеристик.

## Метод расчета границ локальных экологических норм (метод ЛЭН)

Метод ЛЭН позволяет рассчитать величины границ нормы индикаторов (ГНИ) и границ нормы факторов (ГНФ) на основании объективных критериев [13–16, 18, 19]. Метод основан на компьютерном [5] анализе диаграмм взаимного распределения биологических и физико-химических характеристик (рис. 1), а именно на поиске таких ГНФ и ГНИ, чтобы благополучные значения индикатора сопутствовали допустимым значениям фактора, а недопустимые значения фактора – неблагополучным значениям индикатора. В простейшем случае (двух классов качества и недопустимости высоких значений фактора) положение границ проиллюстрировано на рис. 1.

Метод ЛЭН основан на той предпосылке, что исследуемые биоиндикаторы одинаково реагируют на одно и то же воздействие. Тогда, если биологическая характеристика *Y* действительно является индикатором состояния экосистемы, то область *"b"* на диаграмме (рис. 1) должна быть пустой, т.е. недопустимые значения фактора *X* не должны соответствовать благополучным значениям индикатора независимо от действия на него других факторов. В области *"c"* допустимые значения фактора могут сопутствовать неблагополучным значениям индикатора, что обусловлено негативным воздействием на индикатор других факторов. Множественное влияние факторов составляет принципиальное отличие природных экосистем от лабораторных объектов, на которых проводят токсикологические эксперименты по определению нормативов предельно допустимых концентраций (ПДК).

Алгоритм метода ЛЭН состоит в переборе различных границ ГНИ и ГНФ на диаграммах зависимости индикатора от фактора и выборе таких границ, при которых выполнены условия:

1) Область *"b"* оказывается с достаточной точностью пустой. Степень пустоты, характеризуемую критерием точности, определяют по формуле: $ Т=\frac{n\_{a}+n\_{d}}{n\_{a}+n\_{d}+n\_{b}}$, где $n\_{i}$ – число наблюдений в области "*i*" на рис.1. Условие достаточной точности является необходимым, чтобы связь между переменными характеризовала их как индикатор и фактор.

2) Сила связи между качественными классами биологической и физико-химической переменных максимальна. Принцип максимизации силы связи между характеристиками может быть, в частности, обоснован тем, что при его выполнении и сила, и направление связи оказываются определенными с наименьшими ошибками. Схожий принцип использован в корреляционном анализе, где из множества всевозможных положений и направлений прямых, описывающих корреляцию, выбирают такое, которое дает минимальную сумму квадратов отклонений, и, как следствие, максимальный по модулю коэффициент корреляции. Условие максимизации силы связи определяет положение границ между качественными классами переменных, заменяя их субъективный выбор. Для оценки силы связи метод ЛЭН использует коэффициент существенности: $С=\frac{n\_{a}+n\_{d}}{n\_{a}+n\_{d}+n\_{b}}-\frac{\left(n\_{a}+n\_{b}\right)\left(n\_{a}+n\_{c}\right)+(n\_{d}+n\_{b})(n\_{d}+n\_{c})}{\left(n\_{a}+n\_{b}\right)\left(n\_{a}+n\_{c}\right)+\left(n\_{d}+n\_{b}\right)\left(n\_{d}+n\_{c}\right)+(n\_{a}+n\_{b})(n\_{d}+n\_{b})}$. Первая честь формулы – модифицированный критерий точности Чеснокова [23], он учитывает "степень пустоты" области *"b"*, вторая часть – вклад в эту степень собственного распределения переменных.

3) Общее число наблюдений и количества наблюдений в областях *"a"* и *"d"* должны быть достаточно представительными для достоверности анализа: $N>N\_{мин}$; $\frac{n\_{a}}{N}>ПР\_{мин}$; $\frac{n\_{d}}{N}>ПР\_{мин}$, где $n\_{i}$ – число наблюдений в области "*i*" на рис.1, *N* – общее число совместных наблюдений индикатора и фактора, $N\_{мин}$ – минимальное число совместных наблюдений, задаваемое исследователем,$ ПР\_{мин}$ – минимальное значение представительности, задаваемое исследователем.

4) Результаты анализа должны быть значимы с заданной доверительной вероятностью*.* Значимость (доверительную вероятность) полученных результатов оценивают как вероятность того, что при независимости распределений двух характеристик, между которыми проводится поиск связи, не будут найдены границы норм при заданных параметрах минимальной точности и представительности.

Метод ЛЭН позволяет получать границы нормы факторов в случаях, когда недопустимы: слишком высокие значения фактора (например, для содержания ксенобиотиков), слишком низкие его значения (например, для содержания растворенного кислорода в водоемах) или слишком высокие и слишком низкие его значения одновременно (например, содержание биогенных элементов в водах). Метод позволяет вести поиск границ нормы индикаторов, когда неблагополучны слишком высокие его значения (например, смертность организмов), слишком низкие (например, рождаемость в популяции), а также высокие и низкие значения одновременно (например, видовое разнообразие сообщества).

Для каждого фактора метод ЛЭН позволяет рассчитать полноту его вклада в степень "неприемлемости" значений индикаторной характеристики, как долю наблюдений "недопустимых" по фактору и "неприемлемых" по индикатору среди всех "неприемлемых" значений по индикатору (при любых значениях всех факторов): $П={n\_{d}}/{N^{-}}$, где $n\_{d}$ – число наблюдений в области *"d"* на рис. 1, $N^{-}$ – общее количество наблюдений, неблагополучных по индикатору.

Для каждого индикатора метод ЛЭН позволяет определить показатель достаточности программы наблюдений $Д={M^{-}}/{N^{-}}$, где $M^{-}$ – количество наблюдений, недопустимых хотя бы по одному из факторов, существенных для экологического неблагополучия данного индикатора, $N^{-}$ – общее количество наблюдений, неблагополучных по индикатору. Чем выше величина достаточности программы наблюдений, тем выше доля факторов, включенных в программу наблюдений, среди причин экологического неблагополучия индикатора. Низкая величина достаточности свидетельствует о высоком неблагополучном влиянии на значения индикатора факторов, отсутствующих в программе наблюдений.

Метод ЛЭН позволяет проводить поиск ГНФ, как совместно с поиском ГНИ, так и при ГНИ, заданной до поиска из экспертных соображений. Аналогично можно проводить поиск только ГНИ, задавая значение ГНФ.

Алгоритм метода позволяет рассчитать границы нормы для произвольно задаваемого исследователем числа классов качества экосистемы. Границы между различными классами могут играть роль нормативов качества среды для водных объектов различного целевого назначения и для различных категорий использования вод. Также найденные границы могут играть роль взаимосогласованных границ классов в классификаторах качества вод по биологическим и физико-химическим показателям.

# Примеры применения in\_situ-технологии для водных объектов России и сопредельных стран

## Выявление групп однородности по отношению к причинам, не оказывающим воздействия на качество среды

Одна из задач, поставленных в работе – соотнести различия в значениях индикатора с влиянием факторов среды. Однако эти различия, как было отмечено выше, могут быть вызваны и иными причинами, в частности, сезоном наблюдений, принадлежностью пробы к тому или иному типу водного объекта (водотоку или водоему), географическим расположением места отбора пробы. Массив данных делили на группы, позволяющие выявить внутри каждой из них влияние причин, не оказывающих воздействия на экологическое состояние водного объекта. При достоверном отличии значений индикатора между группами, дальнейший анализ проводили для каждой из таких групп однородности в отдельности. При отсутствии различий разделенные на группы наблюдения объединяли для последующего совместного анализа.

Так, при анализе данных по видовой структуре фитопланктонных сообществ Нижнего Дона были выявлены достоверные различия между группой "осенний и летний сезоны" и группой "весенний сезон". При анализе данных по Нижней Волге были выявлены различные сезонные группы однородности: 1) для среднего объема клеток были выделены две группы по влиянию сезонов наблюдений ("с мая по август" и "с сентября по ноябрь"); 2) для значений параметров ранговых распределений *z*2, *z*3, β3 – две другие группы ("с мая по июнь" и "с июля по ноябрь"); 3) для значений индексов выравненности *e*1 – три достоверно различные группы ("с мая по июнь", "с июля по август", "с сентября по ноябрь").

## Выявление существенных для экологического неблагополучия факторов среды и их ранжирование по вкладу в неблагополучие биоиндикаторов

Существенными для экологического неблагополучия названы факторы негативно влияющие на состояние биоиндикатора.

Для рек Европы и Азиатской части России и Узбекистана на основании интегрального показателя качества вод для фито-, зоопланктона и перифитона в толще воды были найдены следующие существенные факторы (факторы упорядочены по их полноте, т.е. вкладу в степень экологического неблагополучия исследуемых экосистем, величина полноты приведена в скобках после показателя):

1. Нижний Дон: температура (0.85), водность (0.55), pH (0.48), O2 (0.18);
2. Дунай: NH4 (0.75), Cr (0.50), Cu (0.42), нефтепродукты (0.33), Zn (0.33), взвешенные вещества (0.33), БПК5 (0.25), Pобщ (0.17), NO2 (0.17), СПАВ (0.17);
3. Днестр: взвешенные вещества (0.31), Cu (0.28), БПК5 (0.28), нефтепродукты (0.23);
4. Средняя Волга: NH4 (0.33);
5. Нижняя Волга: NO3 (0.38), Pобщ (0.15), ХПК (0.15);
6. Обь (район КАТЭК): БПК5 (1.00), Cu (0.45), фенолы (0.25), Zn (0.18), NH4 (0.17);
7. Обь (подбассейн Иртыша): БПК5 (0.59), NO3 (0.34), NO2 (0.29), Pобщ (0.26), NH4 (0.25), Cu (0.22), Mg (0.21), Zn (0.20), Ca (0.19), SO4 (0.18), сумма ионов (0.18), взвешенные вещества (0.16), Cl (0.14), СПАВ (0.14);
8. Енисей (район Забайкалья): Cu (0.22), NO2 (0.11), Pобщ (0.11);
9. Енисей (подбассейн Верхнего Енисея): БПК5 (0.67), нефтепродукты (0.47), NH4 (0.46), NO2 (0.43), лигносульфонат (0.40), O2 (0.21), цианиды (0.20);
10. Лена: БПК5 (1.00), NH4 (1.00), фенолы (50), NO2 (0.50), SO4 (0.50);
11. Амур (подбассейн Амура): ХПК (0.96), pH (0.48), NH4 (0.40), нефтепродукты (0.38), БПК5 (0.33), NO2 (0.31), СПАВ (0.19), Cr (0.18), NO3 (0.10);
12. Амур (подбассейн Уссури): B (1.00), Ni (0.77), БПК5 (0.68), NH4 (0.66), СПАВ (0.66), ХПК (0.65), NO2 (0.55), O2 (0.54), Cr (0.53), Cd (0.50), фенолы (0.34), летучие фенолы (0.31), гексахлоран (0.17), пропанид (0.14), H2S (0.10);
13. Сырдарья: NO2 (0.49), фенолы (0.40), NH4 (0.38), NO3 (0.38), Fe2+ (0.27), Cu (0.25), нефтепродукты (0.21), СПАВ (0.21), минерализация (0.19), БПК5 (0.14), Cr (0.14).

Для тех же рек на основании интегрального показателя качества вод для зообентоса в придонном слое были найдены следующие существенные факторы:

1. Нижний Дон: ДДЭ (0.87), температура (0.80), водность (0.75), pH (0.63), γ-гексахлоран (0.57), Zn (0.28), O2 (0.24), NO3 (0.22);
2. Западная Двина: NO2 (0.75), БПК5 (0.44), Pобщ (0.28), NH4 (0.22), Ni (0.22), ХПК (0.16), взвешенные вещества (0.13);
3. Неман: БПК5 (0.36), NH4 (0.30), ХПК (0.30), Fe2+ (0.27), NO3 (0.12);
4. Верхняя Волга: БПК5 (0.33), ХПК (0.32), NH4 (0.27), NO2 (0.23);
5. Средняя Волга: NH4 (0.38), нефтепродукты (0.36), пестициды (0.12);
6. Нижняя Волга: пестициды (0.26), Pобщ (0.16), NO3 (0.16), Zn (0.11);
7. Енисей (район Забайкалья): NO3 (0.25), Pобщ (0.25), NH4 (0.17);
8. Енисей (подбассейн Верхнего Енисея): БПК5 (0.75), NH4 (0.60), нефтепродукты (0.42), лигносульфонат (0.40), O2 (0.36), NO2 (0.27);
9. Лена: SO4 (1.00), NH4 (0.87), O2 (0.62), нефтепродукты (0.25), БПК5 (0.25), NO2 (0.14), фенолы (0.12);
10. Амур (подбассейн Амура): ХПК (0.78), pH (0.50), NH4 (0.29), БПК5 (0.22), нефтепродукты (0.20), NO2 (0.13);
11. Амур (подбассейн Уссури): ХПК (0.76), Ni (0.67), NH4 (0.60), летучие фенолы (0.60), БПК5 (0.55), Cd (0.50), СПАВ (0.48), O2 (0.44), фториды (0.40), NO2 (0.37), Cr (0.35), гексахлоран (0.22), pH (0.11).

Наибольшее количество факторов, существенных для неблагополучия биоиндикаторов, в целом было получено для бассейна Амура (подбассейн Уссури – 13, подбассейн Амура без Уссури – 6) и Западной Двины – 6. Чаще других переменных за возникновение экологического неблагополучия отвечали: NH4 (в 9 экосистемах из 12 исследованных), нефтепродукты (в 5), БПК5 (в 6), NO2 (в 5). С другой стороны, концентрации O2, Hg, F, а также водность и среднегодовая температура воды ни для одной из экосистем не попали в число существенных факторов.

Для вод Нижней Волги на основании биоиндикаторов – показателей видовой структуры и среднего объема клеток фитопланктона – найдены следующие существенные факторы:

1. сезон "с мая по август" (индикатор – средний объем клетки): водность  (0.50), относительная температура (0.48), O2 (0.39), Ca (0.34), жесткость (0.29), взвешенные вещества (0.26), Na+K (0.25), Nобщ (0.24), NH4 (0.22), сумма ионов (0.21), NO3 (0.20), NO2 (0.19), кремнекислота (0.19), рН (0.19), СПАВ (0.19), фенолы (0.18), PO4 (0.18), Feобщ (0.15), H2S (0.14), Co (0.06), Pb (0.05);
2. сезон "с сентября по ноябрь" (индикатор – средний объем клетки): цветность (0.58), прозрачность (0.50), сумма ионов (0.46), NO3 (0.40), рН (0.39), NO2 (0.38), БПК5 (0.37), Ca (0.36), Mg (0.36), Nобщ (0.35), взвешенные вещества (0.34), нефтепродукты (0.34), кремнекислота (0.31), Na+K (0.30), Cl (0.30), SO4 (0.29), Cu (0.28), PO4 (0.28), жесткость (0.27), ХПК (0.23), Zn (0.21), Feобщ (0.20);
3. сезон "с мая по июнь" (индикатор – индекс выравненности *e*1): прозрачность (0.65), температура (0.62), взвешенные вещества (0.51), цветность (0.39), степень насыщения кислородом (0.29), Nобщ (0.28), Crобщ (0.28), Zn (0.26), Cu (0.25), ХПК (0.25), нефтепродукты (0.24), Cl (0.23), сумма ионов (0.22), Na+K (0.21), кремнекислота (0.21), O2 (0.19), PO4 (0.19), Mg (0.17), Feобщ (0.16), жесткость (0.15).

В целом наибольшее влияние на неблагополучие фитопланктона Нижней Волги оказывают физические показатели, такие как прозрачность и цветность. Несколько меньший вклад характерен для содержания взвешенных веществ, Cl, O2 и суммы ионов. На отдельных, наиболее неблагополучных створах, их состояние часто обусловлено превышением границ норм по загрязняющим веществам (нефтепродуктам, тяжелым металлам и т.п.).

Для вод Нижнего Дона на основании биоиндикацинных показателей видового разнообразия фитопланктонного сообщества найдены следующие существенные факторы:

1. осенний и летний сезоны: O2 (0.80), прозрачность (0.68), Mnобщ (0.64), Mg (0.57), жесткость (0.45), HCO3 (0.39), Zn (0.36), Ca (0.34), сумма ионов (0.34), Na+K (0.32), БПК5 (0.31), pH (0.30), Cr шестивалентный (0.29), α-гексахлоран (0.27), Cl (0.27), cмолы и асфальтены (0.26), Pобщ (0.26), SO4 (0.25), NO2 (0.25), Si (0.24), NH4 (0.24), NO3 (0.24), летучие фенолы (0.23), Cu (0.23), удельная электропроводность (0.22), СПАВ (0.22), Feобщ (0.22), формальдегид (0.19), γ-гексахлоран (0.18), нефтепродукты (0.14);
2. весенний сезон: O2 (0.84), pH (0.34), БПК5 (0.33), NH4 (0.31), нефтепродукты (0.30), NO2 (0.26), Cl (0.23), летучие  фенолы (0.18), СПАВ (0.17).

Для сообщества зообентоса в водоемах Ханты-Мансийского автономного округа найдены следующие существенные факторы:

1. общая численность макрозообентоса: фенантрен (0.70), флуорантен (0.70), пирен (0.60), нефтепродукты (0.45), флуорен+аценафтен (0.24), бенз(b)флуорантен (0.19);
2. общая биомасса макрозообентоса: флуорантен (0.64), пирен (0.55), cd (0.38), нефтепродукты (0.35), Pb (0.33), Zn (0.31), As (0.30), флуорен+аценафтен (0.25);
3. численность Nematoda: флуорантен (0.79), пирен (0.77), Pb (0.64), Zn (0.62), антрацен (0.58), As (0.54), Ni (0.54), Cd (0.36);
4. биомасса Nematoda: антрацен (0.58), пирен (0.58), нафталин (0.44);
5. численность Oligochaeta: антрацен (0.41), бенз(а)пирен (0.39), флуорантен (0.32), дибенз(а,h)антрацен (0.21), флуорен+аценафтен (0.19), бенз(g,h.i)перилен (0.18), бенз(b)флуорантен (0.15), бенз(k)флуорантен (0.14);
6. биомасса Oligochaeta: нефтепродукты (0.33), бенз(а)пирен (0.25), флуорен+аценафтен (0.19), бенз(b)флуорантен (0.19);
7. численность Mollusca: флуорантен (0.92), фенантрен (0.64), нефтепродукты (0.40), флуорен+аценафтен (0.38);
8. численность Hirudinea: нефтепродукты (0.62), фенантрен (0.54), флуорен+аценафтен (0.38), бенз(а)пирен (0.31);
9. биомасса Hirudinea: антрацен (0.80), нефтепродукты (0.57), фенантрен (0.54), Cd (0.40), флуорен+аценафтен (0.38);
10. численность Chironomidae: флуорантен (0.59), нефтепродукты (0.48), бенз(b)флуорантен (0.20);
11. биомасса Chironomidae: Hg (0.74), антрацен (0.46), пирен (0.41), Cd (0.31), бенз(b)флуорантен (0.21);
12. численность Ceratopogonidae: флуорантен (0.59), нефтепродукты (0.44), фенантрен (0.41), бенз(а)пирен (0.41), пирен (0.35), Cd (0.35), нафталин (0.29), флуорен+аценафтен (0.29), антрацен (0.29), бенз(b)флуорантен (0.29);
13. биомасса Ceratopogonidae: флуорантен (0.50), нефтепродукты (0.35), фенантрен (0.35), бенз(а)пирен (0.35), Cd (0.35), пирен (0.30), нафталин (0.25), флуорен+аценафтен (0.25), антрацен (0.25), бенз(b)флуорантен (0.25);

Для ихтиологических индикаторов Цимлянского, Веселовского, Пролетарского и Усть-Манычского водохранилищ найдены следующие существенные факторы:

1. уловы судака и берша: ХПК (0.75), Zn (0.38);
2. уловы леща: NO3 (0.67), pH (0.62);
3. уловы чехони: водность (1.00), pH (1.00), NO2 (0.93), БПК5 (0.80), Cu (0.78), NO3 (0.57);
4. урожайность леща и осетра: γ-гексахлоран (1.00), pH (0.86), O2 (0.65), SO4 (0.58).

Для индикаторов флуоресценции фитопланктона Рыбинского водохранилища найдены следующие существенные факторы:

1. *F*0: прозрачность (0.50), электропроводность (0.48), Pобщ (0.44), ХПК (0.34);
2. *F*орг: БПК5 (0.38), ХПК (0.34), Pобщ (0.34), NO3 (0.31), температура воздуха (0.24);
3. *F*0 фито: Pобщ (0.52), прозрачность (0.49), БПК5 (0.45), ХПК (0.37), температура воды (0.36);
4. *Fm*: Pобщ (0.49), прозрачность (0.48), температура воды (0.33), БПК5 (0.30);
5. *Fm* фито: электропроводность (0.63), прозрачность (0.47), Pобщ (0.46), БПК5 (0.44), Nобщ (0.39), температура воды (0.35), ХПК (0.34), pH (0.30).

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная апробация in\_situ-технологии показала, что для корректного анализа качества вод по физико-химическим факторам необходим раздельный анализ групп наблюдений, однородных, по меньшей мере, по отношению к сезону измерения.

В качестве существенных для экологического неблагополучия факторов в исследованных экосистемах чаще всего встречались различные показатели содержания азота, физические факторы (температура, прозрачность) и биологическое потребление кислорода.

Работа частично поддержана грантами РФФИ №12-07-00580; №13-04-01027.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов В.А., Сущеня Л.М.* Гидробиологический мониторинг пресноводных экосистем и пути его совершенствования // Экологические модификации и критерии экологического нормирования. Труды международного симпозиума. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 41–51.
2. *Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Булгаков Н.Г., Ершов Ю.В., Конюхов И.В., Копылов А.И., Корнева Л.Г., Лазарева В.И., Левич А.П., Литвинов А.С., Масленникова Т.С., Митропольская И.В., Осипов В.А., Отюкова Н.Г., Поддубный С.А., Поромов А.А., Пырина И.Л., Рисник Д.В., Соколова Е.А., Степанова И.Э., Цельмович О.Л.* Данные совместных измерений биологических и физико-химических характеристик экосистемы Рыбинского водохранилища М.: МАКС Пресс, 2011. 67 с.
3. *Булгаков Н.Г., Дубинина В.Г., Левич А.П., Терехин A.Т.* Метод поиска сопряженностей между гидробиологическими показателями и абиотическими факторами среды (на примере уловов и урожайности промысловых рыб) // Известия РАН. Сер. биол. 1995. №2. С. 218–225.
4. *Булгаков Н.Г., Трофимов С.Я., Рябинкин А.В., Рисник Д.В., Левич А.П.* Влияние нефтепродуктов и других загрязнителей на зообентос водоемов, испытывающих воздействие нефтегазового комплекса // Региональная экологическая политика в условиях существующих приоритетов развития нефтегазодобычи: материалы III cъезда экологов нефтяных регионов. Ханты-Мансийск: Профикс, 2013. С. 221–231.
5. *Гончаров И.А., Левич А.П., Рисник Д.В.* Программа установления границ качественных классов для количественных характеристик систем и установления взаимосвязи между характеристиками (Программа установления ГКК) // Свидетельство о регистрации прав на программное обеспечение № 2012616523. Роспатент, 2012.
6. Ежегодники качества поверхностных вод и эффективности проведенных водоохранных мероприятий. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказское территориальное управление по гидрометеорологии. 1984–1991.
7. Ежегодники состояния экосистем поверхностных вод СССР (по гидробиологическим показателям). Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1979–1992.
8. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказское территориальное управление по гидрометеорологии. 1990.
9. Ежеквартальные бюллетени качества поверхностных вод суши. 1975–1983. Ростов-на-Дону. Северо-Кавказское территориальное управление по гидрометеорологии.
10. *Левич А.П.* Экстремальный принцип в теории сообществ // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. Т. 1. С. 164–182.
11. *Левич А.П.* Структура экологических сообществ. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 180 с.
12. *Левич А.П.* Биотическая концепция контроля природной среды // Докл. РАН. 1994. Т. 337. №2. С. 280–282.
13. *Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н.* Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга. М.: НИА-Природа, 2004. 271 с.
14. *Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н., Рисник Д.В.* "In situ"-технология установления локальных экологических норм // Вопросы экологического нормирования и разработка системы оценки состояния водоемов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. С. 32–57.
15. *Левич А.П., Булгаков Н.Г., Рисник Д.В.* Экологический контроль окружающей среды по данным биологического и физико-химического мониторинга природных объектов // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2. № 2. С. 199–207.
16. *Левич А.П., Булгаков Н.Г., Рисник Д.В., Милько Е.С.* Методические проблемы анализа экологических данных и пути их решения: метод локальных экологических норм // Доклады по экологическому почвоведению. 2013. Вып. 18. № 1. С. 9–22.
17. *Левич А.П., Забурдаева Е.А., Максимов В.Н., Булгаков Н.Г., Мамихин С.В.* Поиск целевых показателей качества для биоиндикаторов экологического состояния и факторов окружающей среды (на примере водных объектов р. Дон) // Водные ресурсы. 2009. Т.36. №6. С. 730–742.
18. *Левич А.П., Рисник Д.В., Булгаков Н.Г., Леонов А.О., Милько Е.С.* Методические вопросы применения показателей видового разнообразия фитопланктона для анализа качества вод Нижней Волги // Использование и охрана природных ресурсов. 2010. №5. С. 44–48. №6. С. 33–37.
19. *Левич А.П., Терехин А.Т.* Метод расчета экологически допустимых уровней воздействия на экосистемы (метод ЭДУ) // Вод. ресурсы. 1997. №3. С. 328–335.
20. *Максимов В.Н.* Проблемы комплексной оценки качества природных вод (экологические аспекты) // Гидробиологический ж. 1991. Т. 27. №3. С. 8–13.
21. *Максимов В.Н., Абакумов В.А., Булгаков Н.Г., Левич А.П., Терехин А.Т.* Экологически допустимые уровни абиотических факторов. Исследование водных экосистем Восточной Европы // Вестник МГУ. Серия 16. Биология. 2001. №4. С.36–61.
22. *Максимов В.Н., Абакумов В.А., Булгаков Н.Г., Левич А.П., Терехин А.Т.* Экологически допустимые уровни абиотических факторов. Исследование пресноводных объектов Азиатской части России и Узбекистана // Известия РАН. Серия биологическая. 2002. №5. С. 614–624.
23. *Чесноков С.В.* Детерминационный анализ социально-экономических данных. М.: Наука, 1982. 168 с.
24. Экологический контроль природной среды по данным биологического и физико-химического мониторинга (информационно-аналитическая система) [Электронный ресурс] URL: http://ecograde.bio.msu.ru (дата обращения: 15.08.2009).
25. *Levich A.P.* Phytoplankton requirements in environmental substrate factors and methods of algocoenosis structure management // Zhurnal obschei biologii. 1989. V. 50. № 3. P. 316-328.
26. *Levich A.P., Zamolodchikov D.G., Alekseev V.L.* Limiting link rule for the multispecies community consuming essential resources // Zhurnal obschei biologii. 1993. V. 54. № 3. P. 271-286.
27. *Levich A.P., Artyukhova V.I.* Changes in phytoplankton requirements for environmental substrate factors // Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya biologicheskaya. 1991. № 1. P. 114-123.
28. *Maksimov V.N., Bulgakov N.G., Milovanova G.F., Levich A.P.* Determination analysis in ecosystems: Contingencies for biotic and abiotic components // Biology Bulletin. 2000. V. 27. № 4. P/ 405-413.
29. *Motomura I.* Statistical treatment of association // Japan J. Zool. 1932. V. 44. Pp. 379–383.



**Подрисуночная подпись**

**Рисунок 1.** Классы значений индикатора и фактора при воздействии на индикатор множества факторов среды