ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ МЕТРОЛОГИИ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ УДЕЛЬНОЙ ЧИСЛЕННОСТИ ГИДРОБИОНТОВ

Выявлены метрологические особенности и разработаны специальные принципы оценивания удельной численности гидробионтов. Даны рекомендации по совершенствованию системы и средств наблюдений гидробионтов.

Состояние проблемы

При количественном определении концентраций гидробионтов используется понятийный аппарат метрологии, разработанный для измерения физических величин, который не в полной мере отражает сущность гидробиологических наблюдений.

Цель настоящего исследования – разработать нормативные и технические требования к системе наблюдений гидробионтов в соответствии с физиологическими закономерностями их развития и принципами метрологии.

Материал и методика исследований

Методическая суть исследования заключается в анализе правил, приёмов и технических средств наблюдений гидробионтов на соответствие их нормативным требованиям метрологии.

Исходным материалом для исследований послужили стандарты и нормативные документы по метрологии [2, 8], руководства и рекомендации по проведению гидробиологических наблюдений [9, 11, 12], опубликованные результаты статистического анализа многолетних наблюдений гидробионтов [1, 3-7].

Результаты исследований

Принципиальные различия метрологической сути измерения физических величин и оценивания концентраций гидробионтов. Сущность измерения физической величины заключается в сравнении её с эталоном

измерения. При этом физическая величина характеризуется истинным значением, которое может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений непрерывно совершенствуемыми методами и средствами. Вместо истинного значения для практических потребностей используют так называемое действительное значение физической величины, полученное экспериментальным путём, важным свойством которого является то, что по мере увеличения количества измерений действительное значение приближается к истинному значению. Хотя гидробиологические наблюдения исторически основаны на системе основных физических величин: длине, массе, времени, температуре, количестве вещества и количестве света, однако при определении концентрации гидробионтов, строго говоря, не может использоваться понятие „измерение”, как совокупность операций по применению технического средства, хранящего эталон удельной концентрации гидробионтов. В этой связи целесообразно употреблять термин оценивание, как совокупность операций, обеспечивающих количественное определение удельной численности гидробионтов.

Неосознанное перенесение принципов метрологии на процедуры наблюдений концентраций гидробионтов приводит к ряду неопределённостей и погрешностей

Неопределённости, обусловленные неадекватностью принятых гипотез. В качестве исходной гипотезы при наблюдении концентрации гидробионтов традиционно принимается предположение о Гауссовском законе распределения гидробионтов. В одних случаях это сформулировано явно [9], в других – это следует из алгоритмов обработки результатов наблюдений [12]. Определение доверительных интервалов средних удельных концентраций гидробионтов на основе Гауссовской гипотезы порой приводит к парадоксам, когда нижняя граница доверительного интервала оказывается в отрицательной области. Следовательно, гипотеза о Гауссовских распределениях гидробионтов не является адекватной их статистическим распределениям.

Гидробионтам свойственна не только пространственная, но и временная изменчивость в процессе наблюдений, которые могут продолжаться от нескольких часов до нескольких недель. Привести результаты наблюдений к единому моменту времени практически невозможно, т.к. невозможно выделить временную и пространственную составляющие этих изменений и ввести временную поправку в

результаты наблюдений. Чтобы логически снять неопределённость в методике определений принимают традиционную гипотезу о "мгновенности" наблюдений, чем вносят очевидные грубые погрешности.

Анализ погрешностей процессов отбора и обработки проб, определений удельных концентраций гидробионтов. Инструментальные погрешности количественных определений концентраций гидробионтов зависят от используемых технических средств. Для отбора проб фитопланктона и зоопланктона используются батометры и планктонные сети. Отобранные пробы консервируются с потерей около 25-30% планктона; доставляются в лабораторию и концентрируются, в процессе чего дополнительные потери могут достигать ещё 25-30% численности. Из концентрированной пробы отбираются микропробы, которые под микроскопом подвергаются таксономическому анализу и подсчёту численности (экз./л) отдельных видов. Относительная погрешность подсчёта численности – около 20%. В итоге, различия в оценках численности двух последовательных проб планктона из места отбора могут достигать $\pm 100-200\%$. Установить *случайную и систематическую составляющую погрешностей средств и методов отбора и обработки проб* при такой методике определения удельной численности планктона практически невозможно.

Отбор проб макрозоопланктона, ихтиопланктона, рыб осуществляется посредством тралов. *Случайная составляющая* погрешности улова трала, зависящая от условий траления, и, прежде всего, от волнения, составляет $\pm 20-30\%$ [12]. Расчёт удельной численности (экз./л, экз./м³) гидробионтов выполняется с учётом коэффициента уловистости трала путём деления выловленного количества гидробионтов на объём процеженной воды. Однако не определяются погрешности оценок удельной численности по результатам каждого траления. Как следствие: в гидробиологической практике широко распространено использование оценок удельной численности гидробионтов без указания их доверительных интервалов.

Для оценки поверхностной плотности (т/миля²) гидробионтов используются акустические системы: эхолот и эхоинтегратор. *Случайная составляющая* погрешности акустической системы, обусловленная волнением, термодинамической структурой вод, наличием звукорассеивающих слоёв, может достигать $\pm 50\%$ [12, стр.103]. Установить *систематическую составляющую* погрешности определений

удельных концентраций гидробионтов для планктонных сетей, тралов и акустических систем практически невозможно. Обусловлено это тем, что *систематическая погрешность орудий лова* должна устанавливаться аттестацией по образцовым мерам, но не существует измерительных эталонов удельных численностей гидробионтов в естественной среде. В этой связи погрешность цены деления шкалы интегратора, градуированной по металлическому шару, достигает $\pm 50\%$ [12]. Проведение сквозной градуировки или интерградуировки [12, стр. 79, 82] в какой-то мере лишь минимизирует систематическую составляющую погрешности акустической системы. К *систематической погрешности акустической системы* следует отнести также результаты работы эхоинтегратора. В реальных условиях величина эхосигналов от скоплений сильно флуктуирует от посылки к посылке, поэтому с помощью интегратора определяют суммарные за серию импульсов значения плотности скопления. Интервал интегрирования, по прошествии которого снимаются показания интегратора, обычно принимают от одной до нескольких миль [12]. Значения поверхностной плотности скопления получают в т/миля², которые затем пересчитываются в г/м². И хотя на протяжении интервала интегрирования могут быть проинтегрированы эхосигналы от скоплений различной плотности, вычисленное значение поверхностной плотности в г/м², которое, по сути, является усреднённой характеристикой, не сопровождается стандартным отклонением. Известно, что усреднённые величины любого статистического распределения, приобретают свойства Гауссовского. Таким образом, эхоинтегратор также как и трал преобразовывают законы статистических распределений гидробионтов в Гауссовские и, следовательно, полученные статистические параметры являются смещёнными, а оценки удельных концентраций гидробионтов недостоверными.

Отбор проб гидробионтов для оценки их численности осуществляется методами планктонно-сетевых, траловых, дночерпательных съёмок. *Случайная составляющая метода* наблюдения, не связанная с измерительными средствами, складывается из ошибок определения местоположения плавсредства относительно облавливаемых скоплений и ошибок из-за влияния погодных условий на процесс облова. Вклад *случайной составляющей погрешности метода* наблюдения в оценку удельных концентраций гидробионтов не изучен. *Систематическая составляющая погрешности метода* наблюдения, не

связанная с измерительными средствами, зависит: от соблюдения сроков и продолжительности учётной съёмки, нарушение которых может повлечь биологически значимые изменения в состоянии гидробионтов; от соблюдения границ районов статистически однородных распределений гидробионтов, не учёт которых может привести к смещённым оценкам, а также от соблюдения границ ареала обитания гидробионтов, когда их нарушение может привести к неосознанному измерению численности гидробионтов соседнего гидробиоценоза. Вклад *систематической составляющей погрешности метода* наблюдения в оценку удельных концентраций гидробионтов не изучен.

Проведённый анализ позволяет выявить метрологические особенности количественного определения концентрации гидробионтов:

1) Определения концентраций гидробионтов по акватории не являются равноточными, т.к. выполняются при различных гидрометеорологических условиях.

2) Действительное значение удельной концентрации гидробионтов, по мере увеличения количества определений, не стремится к своему истинному значению, а изменяется с различными тенденциями или принимает нулевое значение.

3) Удельная концентрация гидробионтов формируется под влиянием биологического и гидродинамического факторов, вклад которых разделить практически невозможно, в то время как при оценке удельных концентраций гидробионтов имеет значение преимущественно биологическая составляющая.

В связи с этим практически невозможно выполнить обязательные процедуры классической метрологии при определении концентраций гидробионтов:

1) Установить случайную составляющую и систематическую составляющую результирующей погрешности количественных определений удельных концентраций гидробионтов.

2) Провести структурирование систематических и случайных погрешностей соответственно законам их статистических распределений.

3) Классифицировать погрешности по источникам их возникновения и по специфическому воздействию на систему наблюдений; выделить наиболее существенные факторы, генерирующие систематические погрешности.

4) Провести анализ процесса распространения погрешностей отбора и обработки проб на конечную оценку удельной концентрации гидробионтов вследствие математической обработки результатов наблюдений.

Решение проблемы учёта неопределённостей и погрешностей наблюдений концентраций гидробионтов путём разработки специальных принципов метрологии гидробионтов. В наших рассуждениях воспользуемся в качестве базового классическим принципом метрологии о возможности воспроизведения результатов измерений. Следуя дедуктивным соображениям, в случае определений удельных концентраций гидробионтов свойством воспроизведения должны обладать параметры законов статистических распределений гидробионтов. Сформулированный принцип *воспроизводимости параметров статистических распределений удельных концентраций гидробионтов* имеет экспериментальное подтверждение. Результаты статистического анализа долгосрочных наблюдений гидробионтов [7] позволяют утверждать, что общей статистической закономерностью пространственно-временного распределения гидробионтов в пределах ареала их обитания являются “смешанные” законы статистических распределений, когда кривые плотностей распределений (распределений частот удельных численностей) имеют всплески и смещённые центры распределений. “Смешанные” законы статистических распределений гидробионтов являются следствием объединения в одну выборку результатов определений их удельных концентраций в различных районах, имеющих статистически однородные распределения, т.е. характеризующихся “чистыми” законами статистических распределений гидробионтов. Наличие таких районов обусловлено физиологическими законами существования гидробионтов, гидробиоценологическими закономерностями функционирования водных объектов. Отличительной характеристикой таких районов служат законы статистических распределений гидробионтов, описываемые воспроизводимыми параметрами распределений: средними удельными концентрациями гидробионтов за определённое время на выделенной акватории и стандартными отклонениями. Тогда, располагая воспроизводимой средней удельной концентрацией, каждое фактическое значение удельной концентрации может рассматриваться как случайное отклонение относительно воспроизводимой средней. Это позволяет ввести понятие

случайной погрешности оценивания удельных концентраций гидробионтов и разработать процедуру минимизации погрешностей.

Минимизация погрешностей оценок удельных концентраций гидробионтов. Известно, что случайные неустраняемые погрешности любого рода минимизируются методом статистического усреднения. Систематические составляющие погрешности средств наблюдений минимизируются посредством их технических характеристик, в частности коэффициентов уловистости, устанавливаемых экспериментально при сравнении результатов обловов различными средствами, хотя такие оценки нельзя считать абсолютными. Систематические составляющие погрешности метода наблюдений должны оцениваться путём специальных исследований и указываться в паспорте метода, что остаётся до настоящего времени насущной задачей гидробиологической метрологии. Следовательно, не существует проблемы минимизации случайных составляющих результирующей погрешности определения, но принципиально не решённой остаётся проблема оценки систематической составляющей погрешности метода наблюдений. Установлено, что статистической структуре пространственно-временного распределения гидробионтов свойственно важное метрологическое свойство: превышение, как минимум двойное, случайной составляющей над систематической составляющей результирующей погрешности оценивания удельных концентраций гидробионтов [7]. Это использовано как основание для минимизации результирующей погрешности оценивания численности гидробионтов методом статистического усреднения в соответствии с требованиями математической статистики [10].

Метрологические требования к технологии оценки удельных концентраций гидробионтов: сети отбора проб по акватории; режиму и средствам отбора проб; математическим методам обработки результатов наблюдений. Метрологическая новизна предложенного подхода предусматривает новые процедуры для каждого из этапов традиционных наблюдений гидробионтов: планирования сети и режима отбора проб, выполнения наблюдений и обработки результатов проведённых наблюдений.

Планирование учётной съёмки включает районирование обследуемой акватории и составление схемы пунктов наблюдений. Районирование может выполняться субъективно, основываясь на мнении

экспертов, и объективно методами математической статистики по материалам предыдущих экспедиционных исследований. Для объективного районирования обследуемая акватория разделяется на элементарные площади. После этого все наблюдения за период предыдущих исследований в каждом квадрате условно относятся к центрам квадратов. Из них формируются временные ряды, на основе которых устанавливаются законы статистических распределений гидробионтов во времени по квадратам и вычисляются параметры этих распределений. Используя два первых момента статистических распределений, посредством интеграла вероятностей вычисляются вероятности обнаружения гидробионтов определённой концентрации; строятся картограммы-изоплеты вероятностей обнаружения гидробионтов определённой концентрации; выделяются районы равновероятных концентраций гидробионтов.

Исходными положениями при планировании режима и сети отбора проб гидробионтов служат требования к достоверности и допустимой погрешности оценивания удельных концентраций гидробионтов, что в конечном итоге выражается в количестве наблюдений.

Мерой достоверности оценок выборочных биометрических показателей служит вероятность безошибочного их оценивания [11]. Нулевой порог (0,90) пониженной ответственности рекомендуется при поисковых исследованиях биологических явлений. Первый порог (0,95) соответствует общепринятой ответственности в биологических исследованиях. Второй порог (0,99) повышенной ответственности относится к оценкам экономических ущербов или угроз здоровью людей. Третий порог (0,999) связан со спорными теоретическими вопросами или угрозами жизни людей. Учитывая, что оценки удельной численности гидробионтов являются базовыми при прогнозировании биологической продуктивности водоёмов, очевидно, что оценивание выборочных биометрических показателей гидробионтов относится ко второму уровню ответственности с вероятностью безошибочного оценивания 0,99.

Допустимая погрешность оценивания удельной численности гидробионтов не должна превышать с заданной ответственностью границы, за которыми следуют нежелательные эффекты.

После определения уровня ответственности и допустимой погрешности оценивания, рассчитывается необходимое количество наблюдений и устанавливается режим наблюдений с учётом жизненных

циклов гидробионтов. Схема расположения пунктов наблюдений составляется с учётом гидробиоценологических закономерностей функционирования водного объекта, но большее количество наблюдений сосредотачивается в районах повышенных концентраций.

Выполнение наблюдений предусматривает соответствие действительных метрологических характеристик средств отбора и обработки проб, определённых экспериментально, их нормативным метрологическим характеристикам, указанным в нормативно-технической документации.

Обработка результатов наблюдений включает: исследование законов статистических распределений гидробионтов в ранее выявленных районах равновероятных концентраций гидробионтов, вычисление параметров статистических распределений в каждом районе, определение доверительных интервалов оценок удельной численности гидробионтов.

Выводы

1. Ввиду отсутствия измерительных эталонов гидробионтов в естественной среде принципиально невозможно провести структурирование систематических и случайных погрешностей определений концентраций гидробионтов, определить их вклад в конечную оценку удельных концентраций гидробионтов.

2. Корректная оценка удельных концентраций гидробионтов возможна на основе специальных принципов метрологии гидробионтов:

- воспроизводимости параметров законов статистических распределений гидробионтов;
- минимизируемости погрешностей отбора и обработки проб гидробионтов методом статистического усреднения.

3. Для обеспечения методологического единства традиционные представления о системе наблюдений гидробионтов должны быть дополнены:

- законами и параметрами статистических распределений гидробионтов;
- информацией об источниках ошибок средств и методов наблюдений удельных концентраций гидробионтов;
- стандартизованными методиками оценки параметров законов статистических распределений гидробионтов и минимизации погрешностей наблюдений в результате отбора и обработки проб.

3. Достоверное оценивание запасов гидробионтов требует совершенствования технических средств и систем наблюдения гидробионтов: экспериментальной основой их тарировки могут быть параметры законов статистических распределений гидробионтов.

* *

Виявлено метрологічні особливості та розроблено спеціальні принципи оцінювання питомої чисельності гідробіонтів. Надані рекомендації щодо удосконалення системи та засобів спостереження гідробіонтів.

* *

1. *Архипов А.Г., Ковальчук Л.А., Чащин А.К., Янкаускас В.Ю.* Статистический анализ многолетних наблюдений распределения анчоуса *Engraulis encrasicolus ponticus* в Чёрном море // Вопросы ихтиологии. –1992. – Т. 32. – №3. – С. 176–182.
2. Измерения в промышленности / Справ. изд. под ред. *П.Профоса*. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. – 648 с.
3. *Ковальчук Л.А., Брянцева Ю.В.* Методика определения достоверности оценок численности и биомассы фитопланктонных сообществ Чёрного моря // Гидробиол. ж. – 1999. – Т. 35. – № 3. – С. 101–105.
4. *Ковальчук Л.А., Чащин А.К., Гришин А.Н.* Статистический анализ наблюдений распределения гребневика мнемнопсиса в Чёрном море: определение достоверности и точности оценок биомасс // Тр. ЮГНИРО, 1996. – Т. 42. – С. 172–176.
5. *Ковальчук Л.А., Литвиненко Н.М.* Статистический анализ достоверности и точности оценок численности популяций мидии (*Mytilus galloprovincialis L.*) // Гидробиол. ж. – 1999. – Т. 35. – № 4. – С. 107–112.
6. *Ковальчук Л.А., Онанко Ю.И.* Оценка достоверности многолетних наблюдений сообществ Киевского водохранилища // Наук. праці УкрНДГМІ. – 1999. – Вип. 247. – С. 217–226.
7. *Ковальчук Л.А.* Теоретические и экспериментальные основы оценок запасов гидробионтов: вероятностный подход // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2001. – Вип.249. – С.256–277.
8. Метрология. Основные термины и определения. РМГ 29–99. – Киев: Госстандарт Украины, 2002. – 45 с.

9. Методические рекомендации по оптимизации съёмки запасов на больших акваториях / *Э.И.Кизнер*. – М.: ВНИРО. – 1989. – 13 с.
10. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
11. *Плохинский Н.А.* Достаточная численность выборки / Биометрический анализ в биологии. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. –С. 152–157.
12. Руководство по проведению гидроакустических съёмок –М.: ВНИРО. – 1984. – 123 с.