

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ: МЕТОД ЛОКАЛЬНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НОРМ

Левич А.П.¹, Булгаков Н.Г.¹, Рисник Д.В.², Милько Е.С.³

Контактный адрес электронной почты: apl@chronos.msu.ru

¹ – д.б.н., биологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

² – аспирант, биологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

³ – к.б.н., биологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

Предложен метод установления локальных экологических норм для поиска зависимостей между экологическими характеристиками, для выделения классов качества природных экосистем, для реализации целей экологического контроля – оценки и прогноза состояния экосистем, диагностики и нормирования причин неблагополучия, совершенствования программ мониторинга.

НЕФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ ПРИРОДНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Идея, реализующая биотическую концепцию перехода от лабораторных ПДК к "натурным" нормативам в рамках *insitu*-технологии контроля природной среды (Левич и др., 2011; 2013), казалось бы, лежит на поверхности: нужно проанализировать зависимости "доза-эффект" для факторов среды и биоиндикаторов. Однако реализация этой идеи сталкивается с принципиальными и, как следствие, с методическими трудностями.

В контролируемых условиях лабораторных экспериментов "хорошо организованные" зависимости между биологическими и физико-химическими характеристиками имеют вид однозначных функций, поддающихся корреляционному, регрессионному и другим видам статистического анализа (рис. 1).

В природных экосистемах на биологические характеристики одновременно действует множество факторов среды (среди которых только часть представлена в натурных измерениях). Биологическая характеристика становится функцией многих физико-химических переменных. Зависимость между переменными в этом случае имеет вид "плохо организованного", "размытого" облака точек (рис. 2).

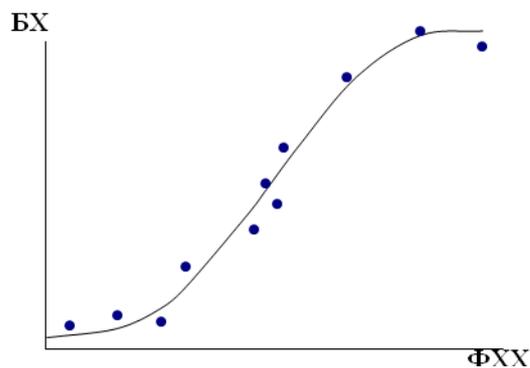


Рис.1. Зависимость между биологической (БХ) и физико-химической (ФХХ) характеристиками в лабораторном опыте

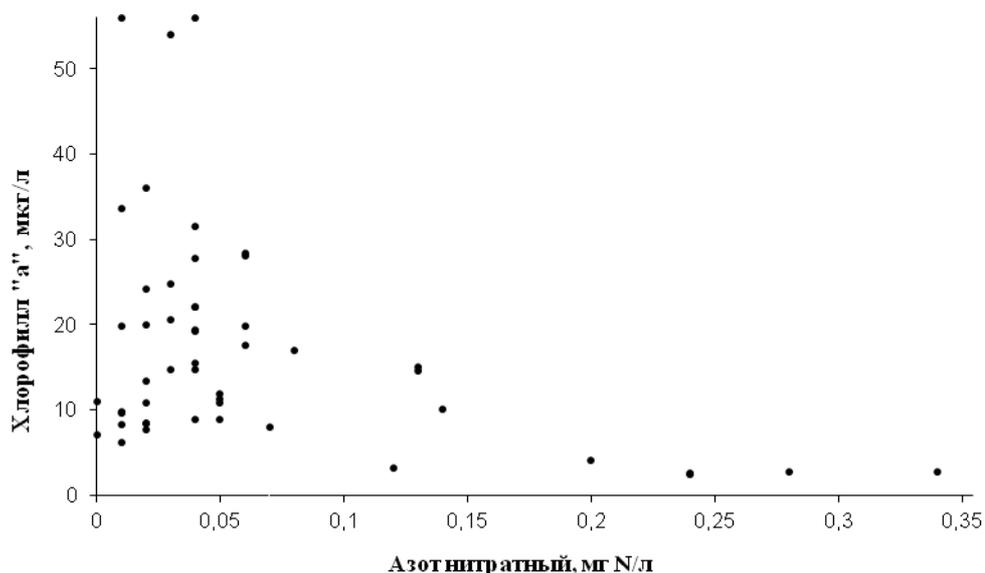


Рис.2. Пример типичной зависимости между значениями биологической и физико-химической характеристик для Рыбинского водохранилища (Данные совместных измерений..., 2011)

Корреляционный анализ "размытых" зависимостей естественно демонстрирует сравнительно низкую и незначимую величину связей. Многомерный регрессионный анализ также осложнен рядом обстоятельств (Налимов, Чернова, 1965):

- Поскольку на биологические переменные влияет множество факторов среды, то регрессионная модель должна включать слишком большое и поэтому трудно анализируемое количество членов. Если, например, мы хотим описать полиномом второй степени зависимость хотя бы от 12 факторов, то модель будет содержать 66 парных произведений факторов, а, например, при 20 или 60 факторах – 190 и 1770 соответствующих членов.

- Рассматривая натурные данные как пассивный многофакторный эксперимент, трудно оценить ошибки эксперимента и, следовательно, нельзя достаточно строго проверить гипотезу об адекватности представленных данных выбранной модели.
- Невозможно построить критерий для отбрасывания выпадающих измерений, содержащих грубые ошибки.
- Некоторые физико-химические переменные оказываются попарно скоррелированными, поэтому их парциальное влияние на биоту невозможно выделить.

Но главное, если даже регрессионный анализ позволяет получить высокий множественный коэффициент корреляции, то остается нерешенной исходная задача о поиске силы связи между биологической переменной и каждым из факторов, поскольку частные коэффициенты корреляции остаются незначительными. Следует добавить, что применение множественного регрессионного анализа очень часто осложнено недостаточным количеством данных, причем недостаточность определяют факторы с самым малочисленным количеством наблюдений, сколь бы много их ни было для других переменных.

Применение многих статистических процедур предполагает, что исходные данные обладают какими-либо априорными статистическими свойствами, например, распределены по гауссовскому, пуассоновскому или другому закону. Однако для реальных экологических данных эти предположения выполняются очень редко.

ОТ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ К КАЧЕСТВЕННЫМ ПЕРЕМЕННЫМ

Один из методов анализа "плохо организованных" данных – переход от количественных переменных к их качественным классам. Такими классами могут быть "низкие", "средние" и "высокие" значения; "благополучные" и "неблагополучные"; "допустимые" и "недопустимые" значения и т.п. После выделения качественных классов возможен поиск корреляций и других видов связи уже между классами различных переменных.

Применение анализа качественных переменных, в свою очередь, сталкивается, по крайней мере, с двумя трудностями. Во-первых, возникает проблема выбора объективного критерия для выделения качественных классов: какие значения считать "высокими" и какие "низкими", какие "допустимыми" и какие "недопустимыми". Обычно границы между качественными классами вводят в большой степени субъективно: например, диапазон измерения характеристики делят на равные интервалы (в линейной или логарифмической шкале) или экспертным образом назначают "высокие" и "низкие" или другие значения. Субъективность выбора границ ставит под сомнение обоснованность всех последующих процедур установления связей. Вторая трудность вызвана упомянутым выше неустранимым *in situ* влиянием на биологические характеристики всех факторов среды и состоит в том, что наблюдаемое значение биологической характеристики может быть вызвано не исследуемым фактором, а какими-либо другими, действующими одновременно с ним.

МЕТОД ЛЭН

Величины границ нормы индикаторов (ГНИ) и границ нормы факторов (ГНФ) в *insitu*-технологии рассчитывают методом локальных экологических норм (методом ЛЭН) (Левич и др., 2010а; 2011). Метод основан на компьютерном (Гончаров и др., 2012) анализе диаграмм взаимного распределения биологических и физико-химических характеристик (рис. 2 и 3), а именно на поиске таких ГНФ и ГНИ, чтобы допустимые значения фактора сопутствовали благополучным значениям индикатора и недопустимые значения фактора – неблагоприятным значениям индикатора. В простейшем случае (двух классов качества и недопустимости высоких значений фактора) положение границ проиллюстрировано на рис. 3. Рис. 3а соответствует идеальному случаю, когда на индикатор действует единственный фактор окружающей среды. Реалистичная зависимость между индикатором и фактором проиллюстрирована на рис. 3б, где в области "с" допустимые значения фактора могут сопутствовать неблагоприятным значениям индикатора. Эти значения обязаны влиянию на индикатор не исследуемого фактора X, а других фак-

торов, воздействующих на индикатор одновременно с X . Множественное влияние факторов составляет принципиальное отличие природных экосистем от лабораторных объектов, на которых проводят токсикологические эксперименты по определению нормативов ПДК.

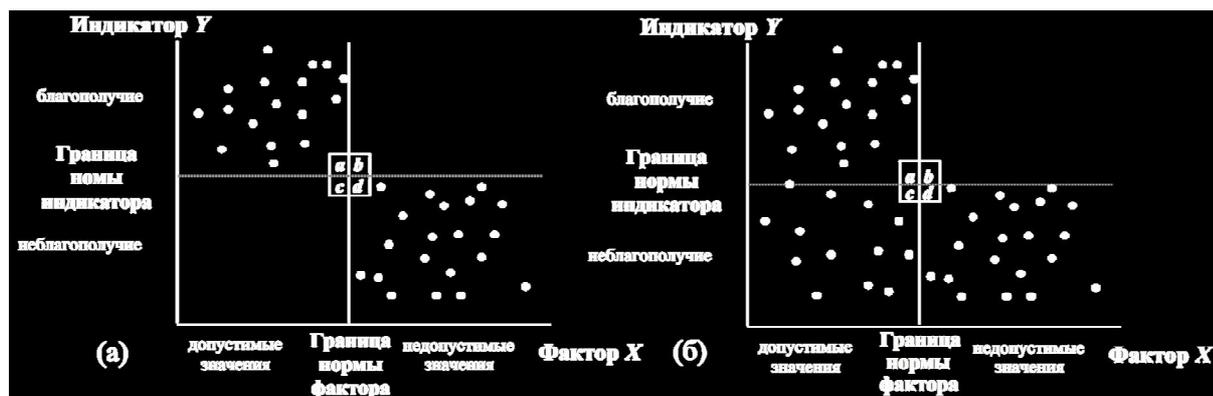


Рис.3. Классы значений индикатора и фактора в идеальном случае, когда на индикатор влияет только один фактор (а), и в реальном наблюдении, когда на индикатор воздействует множество факторов (б)

Однако, если биологическая характеристика Y действительно является индикатором состояния экосистемы, то область "b" на диаграмме (рис. 3) должна быть пустой, т.е. недопустимые значения фактора X не должны приводить к благополучным значениям индикатора независимо от действия на него других факторов.

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

1) Область "b" оказывается с достаточной точностью пустой. Это условие является необходимым, чтобы связь между переменными характеризовала их как индикатор и фактор.

2) Сила связи между качественными классами биологической и физико-химической переменных максимальна, согласно принципу максимальной силы связей (Рисник и др., 2013). Принцип максимизации силы связи между характеристиками может быть обоснован тем, что при его выполнении и сила, и направление связи оказываются определенными с наименьшими ошибками. На аналогичном принципе основан поиск величины парной корреляции и уравнения регрес-

сии. Например, при поиске коэффициентов корреляции минимизируют сумму квадратов отклонений точек распределения от некоторой прямой, причем, чем меньше квадраты отклонений, тем больше коэффициенты корреляции. Другими словами, из бесконечного множества прямых с различными углами наклона и положениями по осям выбирается прямая, имеющая наименьшую сумму квадратов отклонений и, как следствие, наибольший коэффициент корреляции. Полученная прямая дает возможность описать силу и направление связи с наименьшими ошибками. Условие максимизации силы связи определяет положение границ между качественными классами переменных, заменяя их субъективный выбор. Силу связи рассчитывают с помощью коэффициентов связи между качественными классами в таблицах сопряженности (Миркин, 1980). Метод ЛЭН использует коэффициент существенности из детерминационного анализа (Чесноков, 1982). Этот коэффициент пропорционален "степени пустоты" области "b", но учитывает 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.

4) Критерии точности и представительности при поиске границ должны быть таковы, чтобы с заданной доверительной вероятностью исключать случайные конфигурации наблюдений с пустой областью "b".

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 почве или водах). Метод позволяет вести поиск границ нормы индикаторов, когда неблагоприятны слишком высокие его значения (например, смертность организмов), слишком низкие (например, рождаемость в популяции), а также высокие и низкие значения одновременно (например, видовое разнообразие сообщества).

Алгоритм метода позволяет рассчитать границы нормы для произвольно задаваемого исследователем числа классов качества экосистемы. Границы между различными классами могут играть роль нормативов качества для объектов различного целевого назначения и для различных категорий использования окружающей среды.

В приложении к антропогенным экосистемам (в случае использования в качестве биоиндикаторов данных медицинской статистики по заболеваемости населения) результаты могут быть дифференцированы по классам различных заболеваний (Международный классификатор болезней десятого пересмотра содержит 21 класс (Международная классификация болезней. МКБ10, 1989)) и по возрастным группам населения – детям, подросткам и трудоспособному населению.

Применение *insitu*-методологии и метода ЛЭН обеспечивает следующие результаты:

1) Оценку качества окружающей среды для отдельных регионов, их участков и пунктов на количественной шкале "благополучие-неблагополучие".

2) Перечень неблагоприятных факторов окружающей среды любой природы, приводящих к экологическому неблагополучию. Этот перечень может быть составлен для каждого участка или пункта наблюдений.

3) Ранжирование неблагоприятных факторов по их вкладу в степень неблагополучия.

4) Границы нормы для каждого из неблагоприятных факторов. Выход за пределы нормы приводит к экологическому неблагополучию. Эти границы могут быть приняты за нормативы качества окружающей среды для факторов.

5) Количественную меру полноты программ наблюдения за потенциально опасными факторами окружающей среды. Низкая полнота означает, что какие-то факторы, вызывающие экологическое неблагополучие, не включены в программу наблюдений.

6) Прогноз экологического состояния экосистемы по сценариям проектируемых воздействий.

7) Предложения по управлению качеством экосистемы: выбор наиболее опасных факторов с указанием величины снижения нагрузки – данная величина необходима для достижения экологического благополучия.

Подчеркнём преимущества результатов, получаемых методом ЛЭН, перед лабораторным установлением нормативов ПДК. Метод ЛЭН:

- 1) позволяет рассчитать границы нормы для биологических и физико-химических показателей, локальные как в пространстве, так и во времени;
- 2) учитывает фоновые концентрации веществ без необходимости их измерения;
- 3) учитывает не изолированные вредные воздействия, а реально сложившиеся в природе их полные комплексы;
- 4) учитывает многочисленные косвенные эффекты воздействий, совокупное влияние которых может быть более сильным, нежели прямое;
- 5) позволяет рассчитать границы нормы не только для загрязняющих веществ, но и для факторов нехимической природы, например, для тепловых, радиационных, гидрологических и др.;
- 6) позволяет рассчитать как верхние, так и нижние границы нормы для факторов;
- 7) позволяет рассчитать границы, дифференцированные для природных объектов различного целевого назначения и для различных требований к качеству среды;
- 8) позволяет уточнять значения найденных границ нормы по мере накопления новых данных.

Метод ЛЭН апробирован на данных государственного мониторинга пресных вод (Левич и др., 2004; 2009; 2010б; Максимов и др., 2009; Булгаков и др., 2010; Рисник, 2011а, б, в; 2013), на данных наблюдений за экосистемой Рыбинского водохранилища (Левич, 2011; Левич и др., 2012а; 2013), на данных Росстата по демографии, заболеваемости и качеству урбанизированной среды обитания (Булгаков и др., 2011; 2013; Левич и др., 2012б).

Работа частично поддержана грантами РФФИ 12-07-00580 и 11-04-00915а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булгаков Н.Г., Будилова Е.В., Левич А.П., Гончаров И.А. Использование методов анализа массивов многомерных данных для исследования зависимостей показателей рождаемости и смертности населения РФ от экологических и социальных факторов // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. С-Пб.: Институт озераедения РАН, 2011. С. 25-31.
2. Булгаков Н.Г., Левич А.П., Гончаров И.А., Будилова Е.В., Максимов В.Н. Биоиндикация и диагностика состояния антропоных экосистем России по показателям демографии и заболеваемости населения с помощью метода установления локальных экологических норм. 2013 (в печати).
3. Булгаков Н.Г., Рисник Д.В., Левич А.П., Милько Е.С. Анализ экологического состояния вод для отдельных створов Нижней Волги на основе биоиндикации по показателям видового разнообразия фитопланктона // Вода: химия и экология. 2010. № 12. С. 27-34.
4. 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.
5. Данные совместных измерений биологических и физико-химических характеристик экосистемы Рыбинского водохранилища / 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. М.: МАКС Пресс, 2011. 67 с.
6. Левич А.П. Что может дать метод установления экологических норм для поиска сопряженностей между биотическими и абиотическими характеристиками природных экосистем // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы. Борок, 2011. С. 138-142.

7. Левич А.П., Булгаков Н.Г., Барабаш А.Л. Использование данных о демографии и заболеваемости населения для установления стандартов качества окружающей среды // Здоровье человека и экология. М., 2012б (в печати).
8. Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н. Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга. М.: НИИ-Природа, 2004. 271 с.
9. 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.
10. Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н., Фурсова П.В. Insitu-методология оценки качества среды обитания: основные положения. 2013 (в печати).
11. 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. 2010а. Т. 2. № 2. С. 199-207.
12. Левич А.П., Булгаков Н.Г., Рисник Д.В., Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Ершов Ю.В., Конюхов И.В., Литвинов А.С., Осипов В.А., Отюкова Н.Г., Поддубный С.А., Пырина И.Л., Степанова И.Э., Цельмович О.Л. К обоснованию границ классов в классификаторах качества вод // Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике: сб. науч. тр. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012а. С. 240-246.
13. Левич А.П., Булгаков Н.Г., Рисник Д.В., Э.С. Бикбулатов, Е.М. Бикбулатова, Ю.В. Ершов, И.В. Конюхов, А.И. Копылов, Л.Г. Корнева, В.И. Лазарева, А.С. Литвинов, В.А. Осипов, Н.Г. Отюкова, С.А. Поддубный, И.Л. Пырина, Е.А. Соколова, И.Э. Степанова, О.Л. Цельмович. Поиск связей между биологическими и физико-химическими характеристиками экосистемы Рыбинского водохранилища. Часть 3. Поиск границ классов качества вод // Компьютерные исследования и моделирование. 2013 (в печати).

14. 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 бассейна Дона) // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 6. С. 730-742.
15. Левич А.П., Рисник Д.В., Булгаков Н.Г., Милько Е.С., Леонов А.О. Методические вопросы применения показателей видового разнообразия фитопланктона для анализа качества вод Нижней Волги // Использование и охрана природных ресурсов России. М.: НИИ-Природа, 2010б. № 5. С. 44-48. № 6. С. 33-37.
16. Максимов В.Н., Соловьев А.В., Левич А.П., Булгаков Н.Г., Абакумов В.А., Терехин А.Т. Методика экологического нормирования воздействий на водоемы, не нормируемых методами биотестирования (на примере водных объектов бассейна Дона) // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 2. С. 335-340.
17. Международная классификация болезней. МКБ 10. 1989. <http://www.mkb10.ru/>.
18. Миркин Б. Г. Анализ качественных признаков и структур. М., 1980. 319 с.
19. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 340 с.
20. Рисник Д.В. Подходы к выделению размерных классов и определению показателей размерной структуры фитопланктонных сообществ Волжского бассейна // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Самара: Изд-во Самарского НЦ РАН, 2011а. Т. 13 (39). №1 (4). С. 882-890.
21. Рисник Д.В. Показатели размерной структуры фитопланктона в диагностике экологического состояния водных объектов Нижней Волги // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы. Борок, 2011б. С. 159-163.
22. Рисник Д.В. Анализ влияния сезонных и географических факторов, особенностей отбора и обработки проб на биоиндикационный потенциал размерной структуры сообществ фитопланктона Волги // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем II. С-П.: Любавич, 2011в. С. 119-124.
23. Рисник Д.В. Диагностика экологического состояния вод бассейна Нижней Волги по показателям размерной структуры фитопланктона. 2013 (в печати).

24. Рисник Д.В., А.П. Левич, Н.Г. Булгаков, Э.С. Бикбулатов, Е.М. Бикбулатова, Ю.В. Ершов, И.В. Конюхов, А.И. Копылов, Л.Г. Корнева, В.И. Лазарева, А.С. Литвинов, В.А. Осипов, Н.Г. Отюкова, С.А. Поддубный, И.Л. Пырина, Е.А. Соколова, И.Э. Степанова, О.Л. Цельмович. Поиск связей между биологическими и физико-химическими характеристиками экосистемы Рыбинского водохранилища. Часть 1. Детерминационный анализ // Компьютерные исследования и моделирование. 2013 (в печати).
25. Чесноков С.В. Детерминационный анализ социально-экономических данных. М.: Наука, 1982. 168 с.

METHODOLOGICAL PROBLEMS OF ENVIRONMENTAL DATA ANALYSIS
AND THE WAYS OF ITS SOLUTIONS: METHOD OF LOCAL
ENVIRONMENTAL NORMS

Levich A.P., Bulgakov N.G., Mil'ko E.S., Risnik D.V.

Biology Faculty of Moscow State University

A method for establishing local environmental norms for finding relationships between environmental characteristics, for selecting quality classes in natural ecosystems, for purposes of environmental control, such as assessment and prediction of ecosystem health, diagnostics and standardization of distress causes, for improving monitoring programs, is offered.