

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Д.В. Московченко, Т.А. Шарапова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ БИОЛОГИЧЕСКИМИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА УЧАСТКАХ НЕФТЕДОБЫЧИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

По данным мониторинга на реках Обь и Ватинский Еган с применением корреляционного и регрессионного анализа проведена оценка влияния физико-химических и химических параметров водной среды на сообщества зооперифитона. Выявлено, что показатели биоразнообразия и жизнеспособности зооперифитона в очень высокой степени определяются физико-химическими и химическими показателями водной среды. Видовое разнообразие в наибольшей степени зависит от содержания органического вещества, а обилие зооперифитона (общее количество особей) — от кислотно-щелочных условий.

Зооперифитон, гидрохимические показатели, корреляционный и регрессионный анализ, Обский бассейн.

Существуют три класса математических моделей в экологии — описательные, качественные и имитационные [1]. Классические имитационные модели биологических сообществ, основанные на Вольтерровских уравнениях, учитывают показатели рождаемости и смертности организмов, гибель их от внешних факторов (например хищников), а также пищевые ресурсы. Очевидно, что построение математических моделей экосистем должно учитывать состояние среды обитания. Для водных экосистем, так же, как и для отдельных групп гидробионтов, крайне важными являются физические и химические характеристики среды, которые во многом определяют численность видов и биомассу — показатели, наиболее часто используемые в моделировании. Наиболее часто при моделировании водных экосистем учитывают запас питательных элементов — например фосфора, содержание которого определяет биомассу планктона и некоторых других групп организмов, или концентрацию растворенного кислорода [2, 3]. Другие химические вещества, наоборот, замедляют рост организмов, ограничивают рождаемость, увеличивают смертность, а при высоких концентрациях могут полностью подавить жизнедеятельность гидробионтов.

Поэтому построение сложных имитационных моделей экосистем должно учитывать показатели, характеризующие состояние среды обитания и определяющие рост или отмирание организмов, то есть динамику численности или биомассы популяций. В математических моделях эти показатели, как правило, представлены в виде коэффициентов, которые в дифференциальных уравнениях определяют скорость роста или смертности биологических объектов. Простейшим примером является модель убыли числа особей (N) в популяции.

$$dN/dt = \mu N, \quad (1)$$

где μ — коэффициент смертности. Соответственно, прогнозировать влияние загрязнений в водоемах на численность популяции можно с использованием формулы

$$N = N_0 e^{-\mu t}. \quad (2)$$

Для количественного определения влияния отдельных факторов среды обитания или их совокупности используют упрощенные интегрированные модели типа «воздействие — отклик», основанные на данных большого числа наблюдений над экосистемой. Однако эмпирические коэффициенты, характеризующие состояние экосистемы и реакцию на воздействие, достаточно трудно определить [4].

Для выявления химических и физико-химических характеристик окружающей среды, влияющих на биоту, необходимо использование математических методов, позволяющих выделить в многомерном пространстве экологических факторов область неблагополучия [5], или, по другой методике, область сохранения устойчивости [6]. Использование математических методов, дающих возможность применения количественных показателей для оценки обратных связей в экосистемах, находящихся под влиянием антропогенных факторов, крайне актуально для сохранения биоразнообразия севера Западной Сибири. Проблема изучения динамики водных организмов под влиянием изменяющихся физических и химических показателей среды обитания усложняется тем обстоятельством, что состав загрязнителей в районах нефтедобычи весьма многообразен — техногенное воздействие приводит к поступлению в реки и озера сырой нефти, нефтепродуктов, высокоминерализованных пластовых вод, поверхностно-активных веществ, тяжелых металлов, соединений азота. Глобальные и локальные воздействия приводят к изменению кислотности азотных условий, снижению содержания растворенного в воде кислорода. Таким образом, на экологическую ситуацию влияет множество параметров, и один гидрохимический показатель, как правило, не детерминирует состояние водных экосистем. Многофакторность воздействия не позволяет четко прогнозировать экологические последствия. Поэтому важнейшей задачей является выделение наиболее опасных для биоты загрязнителей и определение групп организмов, индицирующих отдельные виды воздействия. Для ее решения необходим поиск связей между биологическими и физико-химическими характеристиками водных экосистем с применением математических методов, чему в недавнее время уделяется большое внимание [7–9].

Цель представленной работы — проанализировать индикаторную роль гидробионтов в оценке экологического состояния водных объектов севера Западной Сибири с применением математических методов, выявить гидробиологические и гидрохимические показатели, необходимые для создания имитационных моделей водных экосистем, находящихся под влиянием нефтедобычи. Основу уравнений экологических моделей составляют различные эмпирические закономерности, установленные в процессе изучения и обработки результатов наблюдений [10]. В нашем случае для моделирования использован анализ изменения состояния индикаторных групп гидробионтов (зообентоса и зооперифитона) от химических и физико-химических параметров водной среды. Эффективность применения этих групп гидробионтов показана в работе [11], где была проведена оценка функций благополучия зообентоса от многофакторного воздействия и типизированы ответные реакции в зависимости от свойств биотопа и характера орказываемого воздействия.

Традиционно для оценки качества воды используется метод, когда совокупности количественных гидробиологических показателей, определенных для

каждого измерения, ставится в соответствие некоторое множество гидрологических и гидрохимических данных, сопряженных по точке и времени взятия пробы [12]. То есть задача сводится к определению многофакторного воздействия на сообщество зообентоса и зооперифитона. Возможность его определения была показана в [11], где выявлены зависимости нормированных характеристик макрозообентоценозов от показателя многофакторных антропогенных воздействий.

В работах [1, 3] было показано существование зоны оптимальных концентраций химических веществ, при которых гидробиологические показатели (численность, биомасса и др.) достигают максимальных значений. Рост концентраций выше допустимых значений приводит к их падению, а при достижении определенного уровня — к полному уничтожению популяций гидробионтов. Для определения области устойчивого состояния экосистемы (ОСУ) по отношению к n -факторному воздействию, было предложено [6] нормировать отклонения значений всех факторов от границы оптимального диапазона:

$$x_{ij} = (X_{ij} - X_{iopt})(X_{itol} - X_{iopt})^{-1}, \quad (3)$$

где X_{ij} — абсолютное j -е значение фактора X_i , X_{iopt} — граница оптимального диапазона значений фактора X_i , X_{itol} — граница толерантного диапазона фактора X_i , x_{ij} — нормированное j -е значение фактора X .

Однако роль гидрохимических показателей в сохранении стабильного состояния экосистем неодинакова. Поэтому при построении имитационных и описательных моделей необходим предварительный отбор информативных признаков экологического состояния водных объектов.

В статье использованы данные гидрохимического и гидробиологического мониторинга в пунктах наблюдений, расположенных в Ханты-Мансийском автономном округе на реках Обь и Ватинский Еган. Обь — крупнейшая река Западной Сибири, принимающая множество притоков, в составе своих вод дает обобщенную характеристику состояния экосистем водосборного бассейна. Пункты наблюдений охватывали различные гидроэкологические условия. Река Ватинский Еган, протекающая через территорию крупнейшего Самотлорского месторождения, является одной из наиболее загрязненных в Западной Сибири. В то же время часть пунктов наблюдений, по которым проведен анализ, расположена в нижнем течении Оби и находится вне участков прямого влияния нефтедобычи. Массив гидробиологических данных включал в себя такие показатели, как количество видов зооперифитона, суммарная численность, суммарная биомасса, численность ручейников, потребление кислорода и биотический индекс Вудивисса, основанный на учете различных групп гидробионтов. Гидрохимическая характеристика дана по данным наблюдений, полученных в течение исследований 2001–2007 гг. и охватывала такие показатели, как pH, биологическое потребление кислорода (БПК), содержание нефтяных углеводородов (НУВ), хлоридов, нитратного и аммонийного азота, фосфатов, фенолов, анионогенных поверхностно-активных веществ (АПАВ), железа, марганца, цинка, меди.

Для оценки зависимостей между гидрохимическими характеристиками и гидробиологическими параметрами использованы методы корреляционного и регрессионного анализа. Для проведения расчетов использовался пакет программ Statistica 6.0. Анализ массива данных был начат с оценки законов распределения и вычисления ранговых коэффициентов корреляции Спирмена (поскольку распределение для многих параметров не являлось нормальным). Подсчет коэффициентов корреляции (табл. 1) показал зависимость общей

численности зооперифитона, численности ручейников и общей биомассы от таких физико-химических и химических показателей, как величина рН, содержание аммонийного азота, железа, фенола и цинка (для рН связь положительна, а для остальных параметров — отрицательная). Полученные значения коэффициентов корреляции ($R = 0,56–0,88$) достаточно значимы. Исследования зависимостей между физико-химическими и биологическими параметрами в других географических районах обычно не демонстрируют низкую и незначимую величину связей [2].

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции между химическими
и биологическими параметрами
водных экосистем рек Обь и Ватинский Еган**

| Показатель | рН | БПК | NH ₄ ⁺ | NO ₃ ⁻ | PO ₄ ²⁻ | Mn | Fe | Cu | Zn | НУВ | Cl ⁻ | АПАВ | Фенолы |
|------------------------|-------------|--------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|-----------------|--------------|--------------|
| Кол-во видов | -0,03 | -0,71 | -0,19 | 0,26 | -0,12 | -0,23 | -0,28 | -0,48 | -0,22 | -0,45 | 0,23 | -0,48 | -0,17 |
| Общая численность | 0,77 | -0,38 | -0,76 | -0,24 | -0,37 | -0,54 | -0,88 | -0,69 | -0,78 | -0,07 | -0,37 | -0,46 | -0,63 |
| Численность ручейников | 0,79 | -0,30 | -0,57 | 0,00 | -0,24 | -0,44 | -0,73 | -0,64 | -0,65 | -0,19 | -0,49 | -0,41 | -0,57 |
| Общая биомасса | 0,71 | -0,47 | -0,64 | 0,08 | -0,46 | -0,61 | -0,76 | -0,57 | -0,82 | -0,13 | -0,43 | -0,24 | -0,56 |
| Потребление кислорода | 0,69 | -0,40 | -0,57 | 0,12 | -0,34 | -0,55 | -0,71 | -0,53 | -0,70 | -0,30 | -0,46 | -0,24 | -0,51 |
| Индекс Вудвисса | 0,18 | -0,68 | -0,29 | 0,21 | -0,15 | -0,28 | -0,35 | -0,55 | -0,29 | -0,47 | 0,01 | -0,54 | -0,33 |

Примечание. Значимые связи выделены жирным шрифтом.

Выявленная зависимость хорошо объясняется влиянием болотных вод на состав и структуру сообществ зооперифитона. При поступлении кислых болотных вод наблюдается уменьшение рН, рост содержания железа, азота, цинка, фенолов, что неблагоприятно сказывается на состоянии гидробионтов, приводит к сокращению их численности (в особенности ручейников) и падению биомассы. В то же время количество присутствующих видов сильнее всего зависит от показателя БПК (наблюдается отрицательная зависимость). Учитывая, что при повышении значения БПК наблюдается падение числа видов, содержание быстроокисляющейся органики является фактором, лимитирующим видовое разнообразие зооперифитона.

Максимальный коэффициент корреляции $R = -0,88$, соответствующий высокой зависимости по шкале Чеддока, выявлен между содержанием железа и общей численностью зооперифитона. Соответствующий данной связи коэффициент детерминации R^2 составил 0,77, что говорит о том, что вариации значений численности в 77 % могут быть объяснены вариациями содержания общего железа.

Характерно, что основные техногенные загрязнители на территории севера Западной Сибири — нефтяные углеводороды, хлориды, АПАВ — не продемонстрировали значимых корреляционных связей с показателями зооперифитона, что говорит об отсутствии повсеместного влияния нефтедобывающей отрасли на гидросферу обследованного района.

На дальнейшей стадии обработки был использована методика регрессионного анализа. Возможность использования регрессионных методов для оценки параметров различных типов пресноводных экосистем и последующего моделирования описана в [13].

Множественный регрессионный анализ позволяет определить вес вклада каждого фактора (коэффициенты в уравнении регрессии) и исследовать зависимость биологической характеристики от рассчитанного по уравнению регрессии показателя, учитывающего все включенные в анализ факторы (химические параметры водной среды).

На предварительном этапе была выполнено приведение данных к нормальному распределению, для чего выполнено преобразование Барлетта. В табл. 2. приведена общая стандартная модель множественной регрессии для одного из параметров — общей численности организмов зооперифитона. Модель показала очень высокую детерминированность численности зооперифитона от комплекса показателей химического состава (исправленный множественный коэффициент детерминации $R^2_{adj} = 0,87$). Значимость влияния отдельной переменной была оценена по величине коэффициента бета, отражающего меру влияния отдельной переменной на функцию выхода. Из представленной таблицы следует высокая степень влияния рН, содержания марганца и хлоридов.

Таблица 2

Параметры стандартной модели множественной регрессии численности зооперифитона

| Показатель | Beta | Std.Err. of Beta | B | Std.Err. of B | t(1) | p-level |
|-------------------------------|--------|------------------|---------|---------------|--------|---------|
| Intercept | | | -3586,6 | 1058,6 | -3,388 | 0,183 |
| HУВ | -0,172 | 0,293 | -328,8 | 559,5 | -0,588 | 0,662 |
| СГ | 1,260 | 0,697 | 18,1 | 10,0 | 1,808 | 0,322 |
| рН | 1,377 | 0,408 | 1336,2 | 396,3 | 3,372 | 0,184 |
| БПК | -0,611 | 0,174 | -162,6 | 46,2 | -3,517 | 0,176 |
| NH ₄ | -0,582 | 0,518 | -109,1 | 97,2 | -1,122 | 0,463 |
| Mn | 1,585 | 0,908 | 926,3 | 530,4 | 1,746 | 0,331 |
| Fe | 0,051 | 0,612 | 8,0 | 96,1 | 0,083 | 0,947 |
| Cu | -0,183 | 0,273 | -19,2 | 28,5 | -0,672 | 0,623 |
| NO ₃ | 0,238 | 0,227 | 152,7 | 145,5 | 1,050 | 0,485 |
| АПAB | -0,701 | 0,435 | -1577,3 | 979,1 | -1,611 | 0,354 |
| Фенолы | 0,571 | 0,263 | 487,1 | 224,1 | 2,173 | 0,275 |
| Zn | -0,766 | 0,697 | -32,2 | 29,3 | -1,099 | 0,470 |
| PO ₄ ²⁻ | -0,437 | 0,306 | -251,0 | 176,1 | -1,426 | 0,389 |

Примечание. Коэффициент корреляции $R = 0,995$; критерий Фишера $F = 8,13$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,991$; исправленный коэффициент детерминации $R^2_{adj} = 0,869$; $df = 13,1$; стандартная ошибка модели 26,59; уровень значимости нулевой гипотезы $p = 0,1827$

На следующей стадии была проведена процедура «свертывания» массива данных путем удаления малозначащих переменных. В табл. 3 приведены результаты пошаговой модели методом «вперед». Как следует из модели, исключение из нее большого количества малозначащих переменных практически не снижает качества модели — коэффициенты детерминации остались прежними, в то время как коэффициент Фишера существенно вырос.

Процедура сокращения числа используемых в модели параметров изменила значение некоторых из них в описании варьирования функции. Как следует из табл. 3, наибольшее значение коэффициента бета имеют значения рН), БПК, фенолов и меди. Таким образом, регрессионная модель показала, что наиболее стабильным показателем, определяющим численность зооперифитона, является величина рН. Эта переменная является значимой в раз-

личных вариантах регрессионной модели — как с полным набором переменных, так и при удалении незначимых показателей.

Таблица 3

**Модель множественной пошаговой регрессии
численности зооперифитона от совокупности заданных переменных о
(химических параметров водной среды)**

| Показатель | Beta | Std.Err. of Beta | B | Std.Err. of B | t(7) | p-level |
|--------------|---------------|------------------|----------------|---------------|--------------|--------------|
| Intercept | | | -2706,7 | 612,43 | -4,42 | 0,003 |
| Fe | -0,157 | 0,204 | -24,70 | 32,08 | -0,77 | 0,466 |
| Cu | -0,550 | 0,110 | -57,59 | 11,54 | -4,99 | 0,002 |
| НУВ | 0,259 | 0,120 | 494,11 | 229,17 | 2,16 | 0,068 |
| pH | 0,901 | 0,202 | 873,90 | 196,46 | 4,45 | 0,003 |
| БПК | -0,533 | 0,122 | -141,85 | 32,56 | -4,36 | 0,003 |
| Fenol | 0,621 | 0,160 | 529,13 | 136,74 | 3,87 | 0,006 |
| Cl | 0,214 | 0,183 | 3,07 | 2,63 | 1,17 | 0,281 |

Примечание. Коэффициент корреляции $R = 0,977$; критерий Фишера $F = 20,77$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,954$; исправленный коэффициент детерминации $R^2_{adj} = 0,908$; $df = 13,1$; стандартная ошибка модели 22,3; уровень значимости нулевой гипотезы $p < 0,00035$.

Подобным образом были подсчитаны показатели регрессионных моделей для всех биологических характеристик. Наиболее важные из них (исправленный коэффициент детерминации и максимальные значения коэффициентов бета для физико-химических и химических переменных, в максимальной степени влияющих на величину зависимого биотического показателя) представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Основные показатели регрессионного анализа
зависимостей между биотическими и химическими характеристиками
водной экосистемы рек Обь и Ватинский Еган**

| Показатель | Исправленный коэффициент детерминации R^2_{adj} | Наиболее значимые переменные и значения коэффициента бета |
|------------------------|---|---|
| Количество видов | 0,87 | БПК beta = -,90; Cu beta = -,51; Фенол beta = ,627 |
| Общая численность | 0,87 | Cu beta = -,55; pH beta = ,901; БПК beta = -,53; Фенол beta = ,621 |
| Численность ручейников | 0,92 | pH beta = ,92; Фенол beta = ,886; Cu beta = -,61 |
| Общая биомасса | 0,98 | pH beta = ,680; АПАВ beta = ,980 |
| Потребление кислорода | 0,99 | pH beta = 1,18; АПАВ beta = ,534; БПК beta = -,67; Фенол beta = ,571 |
| Индекс Вудивисса | 0,92 | Cu beta = -,71; НУВ beta = -,50; PO ₄ beta = -,57; Fe beta = 1,30 |

Как следует из табл. 4, значение коэффициентов бета не всегда соответствуют значению коэффициентов корреляции. Наиболее очевидно проявляется взаимосвязь количества видов с значением показателя БПК, общей численности и биомассы с величиной pH. Особо следует остановиться на биоиндикаторах нефтяного загрязнения. Учитывая, что содержание НУВ связано

наиболее сильной корреляционной зависимостью с такими показателями, как количество видов и индекс Вудивисса (табл. 1), а также значимую зависимость между содержанием НУВ и индексом Вудивисса в регрессионной модели (табл. 4), можно сделать вывод о целесообразности использования последнего в качестве индикаторного показателя нефтяного загрязнения.

Выводы

Таким образом, показатели биоразнообразия и жизненности зооперифитона в очень высокой степени определяются физико-химическими и химическими показателями водной среды. При составлении моделей сообществ зооперифитона необходимо учитывать, что видовое разнообразие (количество видов) в наибольшей степени зависит от содержания органического вещества (трофности), высокие значения БПК коррелируют со снижением числа видов. Обилие зооперифитона (общее количество особей) зависит главным образом от кислотно-щелочных условий и снижается при закислении. Биомасса увеличивается по мере роста pH. Содержание нефтяных углеводородов в водах Обского бассейна не является главным показателем, детерминирующим структуру сообществ зооперифитона, для индикации нефтяного загрязнения лучше всего подходит индекс Вудивисса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ризниченко Г.Ю.* Математические модели в биофизике и экологии. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 184 с.
2. *Рахуба А.В.* Численное моделирование сезонной динамики фитопланктона в районе приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 3. С. 229–233.
3. *Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б.* Математические модели биологических продукционных процессов. М.: Изд-во МГУ, 1993. 302 с.
4. *Меншуткин В.В.* Искусство моделирования (Экология, физиология, эволюция). Петрозаводск; СПб., 2010. 416 с.
5. *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.
6. *Шуйский В.Ф.* Закономерности лимитирования пресноводного макрозообентоса экологическими факторами. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 1997. 50 с.
7. *Рисник Д.В., Левич А.П., Булгаков Н.Г. и др.* Поиск связей между биологическими и физико-химическими характеристиками экосистемы Рыбинского водохранилища. Ч. 1. Критерии неслучайности связи//Компьютерные исследования и моделирование, 2013 Т. 5. № 1. С. 83–105.
8. *Рисник Д.В., Левич А.П., Булгаков Н.Г. и др.* Поиск связей между биологическими и физико-химическими характеристиками экосистемы Рыбинского водохранилища. Ч. 2. Детерминационный анализ//Компьютерные исследования и моделирование, 2013. Т. 5. № 2. С. 271–292.
9. *Левич А.П., Булгаков Н.Г. Рисник Д.В., Милько Е.С.* Экологический контроль окружающей среды по данным биологического и физико-химического мониторинга природных объектов // Компьютерные исследования и моделирование, 2010. Т. 2. № 2. С. 199–207.
10. *Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н.* Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 1. Гидродинамика озер // Водные ресурсы, 2013, Т. 40. № 6. С. 566–582.
11. *Шуйский В.Ф., Максимова Т.В., Петров Д.С.* Изоболический метод оценки и нормирования многофакторных антропогенных воздействий на пресноводные экосистемы по состоянию макрозообентоса. Междунар. академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ), 2004. 304 с.

12. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

13. Страшкраба М., Гнаук А. Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. М.: Мир, 1989. 376 с.

14. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в географических и экологических исследованиях. М.: Изд. Центр «Академия», 2004. 416 с.

г. Тюмень, ИПОС СО РАН
land@ipdn.ru
tshartum@mail.ru

D.V. Moskovchenko, T.A.Scharapova

**INTERDEPENDENCE MODELLING
BETWEEN BIOLOGICAL AND PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS
OF WATER ECOSYSTEMS ON SITES OF OIL PRODUCTION OF WESTERN SIBERIA**

According to the monitoring on the Ob and Vatinsky Yegan rivers, using correlation and regression analysis the influence of physico-chemical and chemical parameters of the aquatic environment in the community of zooperiphyton is evaluated. It is revealed that indicators of zooperiphyton biodiversity and vitality in a very high degree determined by the physico-chemical and chemical characteristics of the water environment (the value of multiple determination coefficient of regression model $R^2 = 0.87$ to 0.99). Species diversity is most dependent on the content of organic matter, zooperiphyton abundance (total number of individuals) — from the acid-alkaline conditions. A decrease in the number of zooperiphyton under the influence of acidic bog waters is revealed. To indicate oil contamination is best to use an Woodiwiss index.

Correlation and regression analysis, zooperiphyton, hydrochemical indicators, Ob River basin