

УДК [595.771:556.535.6].08

М. В. Гапеева, Л. А. Кучай, Р. А. Ложкина

**ЭМПИРИЧЕСКИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ РОСТОМ  
ЛИЧИНОК *CHIRONOMUS RIPARIUS* И  
СОДЕРЖАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУППЫ МЕТАЛЛОВ  
В СОСТАВЕ ПРЕСНОВОДНЫХ ДОННЫХ  
ОТЛОЖЕНИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

С помощью линейно-гребенчатой регрессии определена группа металлов: Li, Be, Na, Mg, K, Ca, Mn, Co, Cu, Rb, Sr, Cs, Ba, Tl, Pb, сумма легких (La, Ce, Pr, Nd, Sm) и сумма тяжелых (Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Lu) редкоземельных элементов в донных отложениях, содержание которых в них коррелирует с ростом личинок *Chironomus riparius*. Используются методы многомерного статистического анализа и приложения теории нечетких множеств, в частности функции желательности. Показано, что металлы первых двух групп таблицы Менделеева объясняют 79,5% вариаций изменения размеров личинок. Определены интервалы концентраций общих форм химических элементов, при которых происходит оптимальный рост личинок хирономид на основе шкалы и функции Харрингтона.

**Ключевые слова:** *Chironomus riparius*, рост, донные отложения, металлы, многомерная статистика, функция желательности Харрингтона.

Личинки хирономид являются важным компонентом сообществ бентосных беспозвоночных, поэтому их связь с донными отложениями (ДО), в которых они обитают, исследуется достаточно интенсивно. При этом ДО рассматриваются как среда обитания, укрытие, источник пищи и токсических соединений [9]. На фоне многочисленных факторов, определяющих распределение личинок хирономид, главными считаются седимент-связанные токсиканты, а также качество и количество пищи [8]. Интерес к исследованиям взаимосвязи массы и размеров личинок хирономид (L, мм) с характеристиками ДО объясняется также тем, что личинки используются в качестве тест-объектов при биотестировании ДО [7], как звено в пищевой цепи рыб [11].

Цель настоящего исследования — определить общие формы химических элементов группы металлов (экстракция  $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ ) в ДО, содержание которых коррелирует с ростом личинок хирономид, используя линейно-гребенчатую регрессию и определить интервалы концентраций химических элементов, действующих «очень хорошо» на рост личинок с помощью функции желательности Харрингтона.

© М. В. Гапеева, Л. А. Кучай, Р. А. Ложкина, 2018

**Материал и методика исследований.** Пробы ДО отбирали дночерпателем Экмана — Берджи (ДАК-250) с площадью захвата  $1/40 \text{ м}^2$  с горизонта 0—10 см в ходе комплексной экспедиции в период с августа по сентябрь 2015 г. на р. Волге (Иваньковском, Рыбинском, Горьковском, Чебоксарском, Куйбышевском и Саратовском водохранилищах). Всего было отобрано 43 пробы.

Для химического анализа пробоподготовку ДО проводили по методике [1]. Концентрации общих форм Li, Be, Na, Mg, K, Ca, Mn, Co, Cu, Rb, Sr, Cs, Ba, Tl, Pb, суммы легких (La, Ce, Pr, Nd, Sm) и суммы тяжелых (Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Lu) редкоземельных элементов определяли на приборе ICP MS DRC-e с применением внутреннего стандарта In [10].

Для проведения эксперимента по изучению влияния химического состава ДО на рост личинок *Chironomus riparius* (Meigen, 1804) пробы ДО сушили на воздухе, просеивали через сито 0,2 мм, затем растирали в керамической ступке<sup>1</sup>. Полученные ДО прокаливали в муфельной печи при 600°C до постоянного веса.

Эксперименты проводили в двух повторностях. В чашки Петри помещали 15 г ДО, заливали 25 мл отстоянной, аэрированной водопроводной водой. Через сутки в каждую чашку помещали по 30 личинок хирономид первой стадии развития длиной 3—5 мм. Личинок кормили суспензией кормовых дрожжей через каждые двое суток по 150 мг на чашку Петри. Среднее количество погибших личинок составляло 31,69% от всей выборки. Через 14 сут личинок промывали через мельничный газ, фиксировали формалином. Измеряли длину каждой личинки из двух повторностей и рассчитывали их среднеарифметическую длину для каждой пробы ДО. Средняя длина личинок в выборке составляла  $8,575 \pm 1,51$  мм, стандартная ошибка среднего арифметического — 0,218.

Статистическую обработку результатов исследования проводили с помощью программы Statistica 6.1, № аххг606d152667fa, в модуле «Углубленные методы анализа — нелинейное оценивание — кусочно-линейная регрессия». Гребневая регрессия (ридж-регрессия) — это усовершенствованная линейная регрессия с повышенной устойчивостью к ошибкам, применяется для борьбы с переизбыточностью данных, когда независимые переменные коррелируют друг с другом (мультиколлинеарность).

Методы анализа данных с помощью теории нечетных множеств и ее приложения, а именно функции желательности Харрингтона, успешно применяются в экологии, химии и других областях науки [3, 4].

В настоящей работе используется и функция, и шкала Харрингтона. Функция желательности Харрингтона имеет вид:

---

<sup>1</sup> Авторы выражают благодарность Л. В. Самойленко и И. И. Томилиной, сотрудникам лаборатории физиологии и токсикологии водных животных Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН за предоставление результатов определения линейных размеров личинок хирономид.

### 1. Результаты линейно-гребенчатой регрессии между ростом личинок хирономид ( $L$ , мм) и элементным составом ДО

Элементы I и II групп	Все элементы
$L1 = 7,3843 - 0,0307 \times Li + 1,50 \times$ $Be - 0,009 \times Na + 0,0001 \times Mg +$ $0,0005 \times K - 0,000013 \times Ca - 0,0399$ $\times Rb + 0,6259 \times Cs - 0,005 \times Ba$	$L1 = 7,1133 + 0,0098 \times Li - 4,8552$ $\times Be - 0,0051 \times Na - 0,0005 \times Mg$ $- 0,0012 \times K + 0,0002 \times Ca +$ $0,0003 \times Mn + 0,4099 \times Co - 0,0129$ $\times Cu - 0,1347 \times Rb - 0,0093 \times Sr +$ $1,9026 \times Cs - 0,0230 \times Ba - 0,0222 \times$ $R_{\Sigma I} + 0,2261 \times R_{\Sigma II} - 16,5198 \times$ $Tl + 0,2917 \times Pb$
$L2 = 10,5203 - 0,1367 \times Li - 4,5459$ $\times Be - 0,0026 \times Na + 0,00005 \times Mg$ $- 0,00049 \times K + 0,0003 \times Ca -$ $0,1750 \times Rb - 0,01128 \times Sr + 9,0778$ $\times Cs - 0,0295 \times Ba$	$L2 = 10,4540 - 0,3334 \times Li - 3,3329$ $\times Be - 0,0009 \times Na - 0,0001 \times Mg$ $+ 0,0010 \times K + 0,0004 \times Ca -$ $0,0001 \times Mn - 1,5884 \times Co - 0,1376$ $\times Cu - 0,0917 \times Rb + 0,0596 \times Sr +$ $14,6892 \times Cs - 0,0624 \times Ba + 0,0482$ $\times REE_I + 0,0379 \times REE_{II} - 84,6690 \times$ $Tl + 1,3023 \times Pb$
доля дисперсии = 0,7228 $R=0,8502$	доля дисперсии = 0,8580 $R=0,92627$

\*  $R_I$  — сумма легких редкоземельных элементов,  $R_{II}$  — сумма тяжелых редкоземельных элементов, точка разрыва 8,575 мм соответствует среднему значению длины личинок в выборке.

$$G(x) = \exp(-Z^2(x)), \text{ где } Z(x) = \frac{2x - a - b}{b - a}.$$

Здесь:  $a$  — левая,  $b$  — правая граница диапазона желательных измерений рассматриваемого компонента,  $X = \{xi\}$  — ряд наблюдений рассматриваемого компонента,  $i = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  — число членов ряда.

#### Результаты исследований и их обсуждение

В результате настоящего исследования по содержанию концентраций общих форм химических элементов в ДО р. Волги и изменению линейных размеров личинок хирономид в экспериментальных условиях получена матрица из 17 переменных и 66 строк<sup>2</sup>.

В кусочно-линейном регрессионном анализе в качестве зависимой переменной рассматривали длину личинок, независимых переменных — концентрации химических элементов в ДО (табл.1). Так как личинки относятся к животным с ограниченным ростом, точкой разрыва служила их средняя длина, равная 8,58 мм. До точки разрыва изменение роста личинок описывается уравнением  $L1$ , после точки разрыва — уравнением  $L2$ . Рассматривали два варианта: в первом случае рассчитывали связь длины личинок лишь с элементами первой и второй групп таблицы Менделеева, во втором — со всеми изученными 17 элементами.

<sup>2</sup> Первичные данные можно получить у авторов статьи.

2. Нормированные значения концентраций общих форм элементов I и II групп таблицы Менделеева в ДО р. Волги

Оценки	Интервалы Ф.Ж.	Li, мкг/г	Na, мкг/г	K, мкг/г	Rb, мкг/г	Cs, мкг/г	Mg, мкг/г	Ca, мкг/г	St, мкг/г	Ba, мкг/г
Очень хорошо	1,0—0,8	9—25	59—146	118—3073	12—31	1—2	1356—3974	1511—4332	22—60	71—193
Хорошо	0,8—0,6	5—9	39—59	785—1178	7—12	0—1	887—1356	576—1511	14—22	45—71
Удовлетворительно	0,6—0,4	1—5	10—39	92—785	1—31	0	14—1356	341—576	1—14	4—45
Очень плохо	0,2—0,0	38—62	219—3803	4759—6122	48—72	3—5	5920—9948	6445—8795	92—123	296—365

\* Жирным шрифтом отмечены максимальные интервалы концентраций для оценок «очень хорошо», «хорошо» и «удовлетворительно».

Верификация уравнения  $L2$  во втором варианте линейно-гребенчатой регрессии для связи роста личинок с составом грунта, отобранного в устье р. Сутки (приток Рыбинского водохранилища), показала рост личинок равным 9,86 мм (в эксперименте — 8,32—10,0 мм). По литературным источникам, присутствие в ДО тяжелых металлов (ТМ) замедляет рост личинок хирономид [2, 5]. Из данных таблицы 1 следует, что присутствие Ва, Тl и некоторых других ТМ замедляют рост личинок хирономид, причем после точки разрыва в значительно большей степени.

Уравнения линейно-гребенчатой регрессии с использованием концентраций общих форм элементов I и II групп таблицы Менделеева объясняют дисперсию роста личинок на 72%, с коэффициентом корреляции 0,85 ( $p < 0,05$ ). Гидробионты постоянно поддерживают во внутренней среде осмотическое давление, концентрацию минеральных веществ и рН, значительно отличающихся от этих показателей в пресной воде. Исследования распределения видов р. *Chironomus* в водоемах с различным гидрологическим режимом показали их высокую избирательность по отношению к содержанию в воде ионов Na, K, Ca и Mg [2]. Таким образом, результаты нашего исследования подтверждают то, что в изменении роста личинок, как и в экспериментальных условиях [6], большую роль играют элементы I и II групп таблицы Менделеева.

Уравнения линейно-гребенчатой регрессии с использова-

нием концентраций общих форм всех анализируемых элементов объясняют дисперсию роста личинок на 85,8%, с коэффициентом корреляции 0,96 ( $p < 0,05$ ) (см. табл. 1).

Алгоритм поиска нормы состояния рассматриваемой системы по нормам ее компонентов с помощью функций желательности (Ф.Ж.) следующий:

— из таблицы линейных размеров личинок хирономид выделены в отдельный файл данные концентраций элементов, при которых результат роста оказался в интервале средних значений 8,32—10,0 мм;

— для каждого элемента этого файла определены граничные значения (*min*, *max*), которые используются при построении функции желательности в качестве левой и правой границ соответствующего элемента по ряду его значений;

— построение функций желательности по формуле для всех элементов, используемых при тестировании;

— построение таблиц нормирования для элементов I и II групп таблицы Менделеева с помощью функций желательности, в которых интервалы концентраций для оценок «очень хорошо», «хорошо» и «удовлетворительно» выделены жирным шрифтом (табл. 2).

### Заключение

Рост личинок *Chironomus riparius* в пресноводных донных отложениях зависит в значительной степени от концентраций общих форм элементов I и II групп таблицы Д. И. Менделеева. Присутствие ТМ, таких как Ва, Тl и некоторых других, замедляет их рост.

Из данных, полученных в настоящем исследовании, для «очень хорошего» роста личинок желательное содержание общих форм макроэлементов в донных отложениях: Na — от 59 до 145 мкг/г, К — от 117 до 3073, Са — от 1511 до 4332 и Mg — от 1356 до 3974 мкг/г.

\*\*

*За допомогою лінійно-гребінчастої регресії визначено елементи з числа Li, Be, Na, Mg, K, Ca, Mn, Co, Cu, Rb, Sr, Cs, Ba, Tl, Pb, суми легких (La, Ce, Pr, Nd, Sm) і суми важких (Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Lu) рідкоземельних металів в донних відкладах, вміст яких в донних відкладах корелює з ростом личинок Chironomus riparius. Використано методи багатовимірного статистичного аналізу і додатка теорії нечіткої безлічі, зокрема функції бажаності. Показано, що елементи перших двох груп таблиці Менделєєва пояснюють 79,5% варіацій зміни розмірів личинок. Визначено інтервали концентрацій загальних форм хімічних елементів, при яких відбувається оптимальне зростання личинок хирономід, на основі шкали і функції Харрінгтона.*

\*\*

*By means of piecewise regression metals from among Li, Be, Na, Mg, K, Ca, Mn, Co, Cu, Rb, Sr, Cs, Ba, Tl, Pb, the sums of light (La, Ce, Pr, Nd, Sm) and the sums of heavy (Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Lu) rare-earth elements in the sediments, the content of which in the*

*sediments correlates with the growth of larvae of Chironomus riparius Meigen. Methods of the multidimensional statistical analysis and the appendix of the theory of indistinct sets, in particular, desirability functions are used. It is shown that elements of first two groups of the table of Mendeleyev explain 79,5 % of variations of change of the sizes of larvae. Intervals of concentration of the general forms of chemical elements at which there is an optimum growth of larvae Chironomus riparius on the basis of a scale and Harringtons function are defined.*

\*\*

1. Баканов А.И., Гапеева М.В., Гребенюк Л. П., Ершов Ю. В., Томила И. И. Оценка качества донных отложений Верхней Волги в пределах Ярославской области // Биология внутр. вод. — 2000. — № 4. — С.163—174.
2. Виноградов Г.А., Шобанов Н.А. Особенности натриевого обмена личинок рода *Chironomus* при различных солености и рН среды // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. — 1990. — Т. 26, № 3. — С. 308—315.
3. Клевлеева Т.З. Использование функции желательности для интегральной оценки качества донных отложений // Экология: теория и практика: Тез. докл. ИЭРиЖ УРО РАН Екатеринбург, 15—19 апр. 2013 г. — Гоштицкий, 2013. — С. 55—56.
4. Лисовенко А.В. Алгоритмы применения функции желательности для комплексной оценки качества сточных вод по токсичности и химическому составу // IV Всерос. конф. по водной токсикологии, посвящ. памяти Б. А.Флерова: Тез. докл. — Борок, 2011. — С. 91—96.
5. Томила И. И., Гапеева М. В. Экотоксикологическая оценка загрязнения кадмием донных отложений водохранилищ Верхней Волги // Биология внутр. вод. — 2000. — № 2. — С.143—147.
6. Шобанов Н. А. Обмен кальция и магния у личинок *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. — 2001. — Т. 37, N 5. — С. 449—451.
7. Adakole J. A., Dauda M. Z., Muhammad A. A. Toxicity Assessment of Bindare Stream Sediment on Chironomid Nutrient Composition and Growth Using Sediment Contact Bioassay: Zaria, Nigeria // Journal of Water Resources and Hydraulic Engineering. — 2015. — Vol. 4, N 2. — P. 198—204.
8. De Haas E.M., van Haaren R., Koelmans A.A. et al. Analyzing the causes for the persistence of chironomids in floodplain lake sediments // Arch. Hydrobiolog. — 2005. — Vol. 162, N 2. — С. 211—228.
9. De Haas E.M., Wagner C., Koelmans A.A. et al. Habitat selection by chironomid larvae: fast growth requires fast food. // Journal of Animal Ecology. — 2006. — Vol. 75. — P. 148—155.
10. Taylor H. E. Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. Practices and Techniques // San Diego: Academic Press. —2001. — 294 p.
11. M. Tschirner, A. Simon Influence of different growing substrates and processing on the nutrient composition of black soldier fly larvae destined for animal feed // Journal of Insects as Food and Feed. —2015. — Vol. 1, N 4. — P. 249—259.

Институт биологии внутренних вод РАН,  
Борок, РФ

Поступила 24.04.18