

органами и генотипами ивы. Этот фактор необходимо учитывать при оценке возможности хозяйственного использования биомассы в том числе в энергетических целях.

- Для эффективной рекультивации загрязненных тяжелыми металлами почв с учетом использования надземной биомасс необходимо учитывать ряд экологических и экономических факторов. К экологическим факторам относится дезактивация почв от загрязнителей, которую рекомендуется осуществлять при одновременном использовании растительной биомассы. Быстрые темпы дезактивации почв может обеспечить интенсивная аккумуляция загрязнителя в биомассе культуры в сочетании с быстрыми темпами роста и накоплением биомассы. Экологически целесообразная утилизация несмотря на дополнительные экономические затраты позволит производить продукцию на основе биомассы для дальнейшего использования;

- Одним из направлений, отвечающих таким требованиям, является выращивание «энергетических» культур, биомасса которых может быть использована как возобновляемый источник для производства зеленой энергии. Перспективным направлением биоэнергетики является использование короткоциклового плантации древесных культур для целей рекультивации, эффективность которого обуславливается быстрыми темпами роста и соответственно накопления биомассы и тем, что однократно заложенная плантация может расти на том же месте более 20 лет не теряя продуктивности, при этом уборка биомассы осуществляется каждые 3-4 года. Следовательно, перераспределение загрязнителей в другие экосистемы за этот период будет минимальным. Кроме того, экспериментально установлено, что себестоимость единиц энергии производимой из биомассы короткоциклового плантации ивы существенно ниже по сравнению с другими энергетическими культурами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pilon-Smiths, E. (2005): Phytoremediation. Annual Review of Plant Biology 56: p. 15–39.
2. Landberg, T., Greger, M. (1996): Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from unpolluted and polluted areas. Appl. Geochem, 11, p. 175–180.
3. Тахтаjian, Л. А. (1981): Цветковые растения (Flowering plants) Том пятый, Часть вторая, Просвещение, Москва, 81–86.
4. Newsholme, C. (1992): Willows: The Genus *Salix*. Batsford. London. Ltd. p. 224. No 129, 7-16.
5. Landberg T, Greger M. (1994): Can heavy metal tolerant clones of *Salix* be used as vegetation filters on heavy metal contaminated land? In: Aronsson P., Perttu, K. (Eds.). Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, pp. 133–144.
6. Urošević J.D., Rodzkin O.I., Stanković D.M. ... Trivan G.Dj. Jovanović, F. A The influence of heavy metals on morphological and physiological parameters of *Salix* clones. Journal of the Belarusian State University. Ecology 2023,4,104–113.
7. Urošević J, Stanković D, Jokanović D, Trivan G, Rodzkin A, Jović Đ, Jovanović F. Phytoremediation Potential of Different Genotypes of *Salix alba* and *S. viminalis*. Plants. 2024; 13(5):735.

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ МЕЖЛИНОЧНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ОТ МАССЫ ТЕЛА У МРАМОРНОГО РАКА *PROCAMBARUS VIRGINALIS*

DEPENDENCE OF THE LENGTH OF THE INTER-LARVAL INTERVAL ON THE BODY WEIGHT OF THE MARBLED CRAYFISH *PROCAMBARUS VIRGINALIS*

Е. А. Улащик, Джу Юй
E. A. Ulashchik, Zhu Yu

Учреждение образования «Международный государственный экологический институт
имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ
г. Минск, Республика Беларусь
ulasikekaterina@gmail.com

International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU
Minsk, Republic of Belarus

В настоящей работе описана зависимость длительности межлиночных интервалов от массы тела у речных раков, на примере мраморного рака *Procambarus virginalis*, который быстро распространяется по пресным водоемам Евразии и Африки с начала XXI столетия. Было выяснено, что длительность межлиночных интервалов возрастает с увеличением массы тела особей и сокращается с ростом температуры.

This paper describes the dependence of the duration of interfinal intervals on body weight in river crayfish using the example of the marbled crayfish *Procambarus virginalis*, which has spread rapidly in freshwaters of Eurasia and Africa since the beginning of the 21st century. It has been found that the duration of interfinal intervals increases with the body weight of the individuals and decreases with increasing temperature.

Ключевые слова: биологические инвазии, инвазивный потенциал, мраморный рак, длительность межлиночных интервалов, температурные пределы.

Keywords: biological invasions, invasive potential, marbled crayfish, duration of inter-lining intervals, temperature limits.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-169-173>

Введение. Рост ракообразных является динамическим процессом, который сопровождается периодически линьками. Во время линьки ракообразные сбрасывают старые внешние покровы, которые мешают их росту. После этого происходит скачкообразное увеличение массы тела в первые несколько суток после линьки, пока новые внешние покровы не затвердеют. Однако на протяжении остальной части межлиночного периода масса особей остается весьма стабильной.

Благодаря частоте линек и величинам приростов массы тела за отдельные межлиночные интервалы можно реконструировать кривые соматического роста десятиногих раков (Голубев, Улащик, 2022) [1]. Недавно были проведены исследования в этом направлении на примере партеногенетического мраморного рака *Procambarus virginialis* Lyko, 2017, который начал быстро расселяться по пресным водоемам Евразии и Африки со времени начала XXI столетия (Kouba et al., 2014) [2].

Таким образом, мы можем заключить, что линька является необходимой составляющей процесса роста ракообразных. Изучение её частотности и характеристик приростов массы тела может помочь нам более глубоко понять динамику развития этих животных.

Материал и методы. В период с 2015 по 2023 годы были проведены исследования на особях из лабораторной культуры *P. virginialis*, которые содержались в МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ. Данная культура была получена от единственной материнской особи и находилась в помещении с плохой системой отопления зимой и высокой температурой летом, где температура колебалась от 13 до 16 °C в декабре-феврале и до 28 – 32 °C в июле-августе. Однако такие условия позволили оценить воздействие температурного фактора на частоту линек у *P. virginialis*.

Ювенильные особи в возрасте 2-3 недель рассаживались поодиночке в сосуды объемом 1 литр, а затем по мере роста переводились в более крупные аквариумы с объемом воды до 5 литров. Все емкости проверялись не реже чем один раз за 1-2 дня для регистрации дат отдельных линек и вымета самками яиц на плеоподы. После каждой линьки и выхода молодых особей из яиц, животных взвешивали. Для дальнейшего анализа использовали значения только длительности промежутков времени между двумя последовательными линьками, при условии, что самки не выметывали яйца и не вынашивали их.

Ежедневно температура воды определялась для расчета средних значений за отдельные периоды эмбрионального развития и межлиночные интервалы. Животных кормили живыми личинками хирономид *Chironomus sp.*, а также молодью дафний *Daphnia magna*, которые задавались с избытком питательных элементов. Не менее дважды за неделю проводилась полная смена воды во всех емкостях.

Весь анализ статистических показателей проводился программным обеспечением STATISTICA 8, а для оценки достоверности средних значений использовался непараметрический критерий Манна-Уитни при уровне значимости $p < 0,05$ для определения различий между параметрами животных.

Результаты и обсуждение. Длительность межлиночных интервалов (D_m) у всех видов ракообразных возрастает с увеличением массы тела особей и сокращается с ростом температуры (Хмелева, Голубев 1984) [3]. Поэтому для устранения воздействия температурного фактора на величины D_m все имеющиеся данные для *P. virginialis* были разделены на отдельные температурные интервалы (таблица 1). Для каждого из них рассчитаны уравнения зависимостей между массой особей сразу же после линьки (W, g) и последующего межлиночного интервала (D_m сутки).

Таблица 1

Параметры уравнения (1) зависимости длительности межлиночных интервалов от массы тела *Procambarus virginialis*

Температурный интервал, °C	Средняя температура, °C	Диапазон массы особей, г	p	q	r*	W_{i+1}/W_i
15,3 – 17,1	16,5	0,148-9,484	45,0	0,2871	0,6382	1,41439
17,5 – 18,9	18,2	0,064-6,950	41,8	0,2185	0,5481	1,28005
19,1 – 20,8	19,7	0,063-6,650	34,0	0,3353	0,7642	1,36185
21,0 – 22,8	22,0	0,200-4,786	24,9	0,5480	0,7100	1,30294
22,9 – 25,2	23,9	0,246-20,52	31,4	0,4275	0,7479	1,33281
25,3 – 28,9	26,2	0,154-4,538	28,3	0,4478	0,7736	1,33145

* - коэффициент корреляции между $\lg D_m$ и gW

Как оказалось (рисунок 1), во всех температурных интервалах зависимость между указанными параметрами у *P. virginialis*, как и у других видов ракообразных, хорошо аппроксимируется степенным уравнением:

$$D_m = pWq, \quad (1)$$

где p и q – эмпирические коэффициенты.

В двойных логарифмических координатах уравнение (1) трансформируется в уравнение прямолинейно регрессии вида:

$$\lg D_m = \lg p + q \lg W \quad (2)$$

Значения степенных коэффициентов q находятся в пределах от 0,2185 до 0,5480, что говорит о достаточно слабом возрастании длительности межлиночных интервалов с массой особей. Тем не менее значения коэффициентов корреляции r достаточно высоки от 0,5481 до 0,7736, что говорит о статистически значимой связи между этими параметрами.

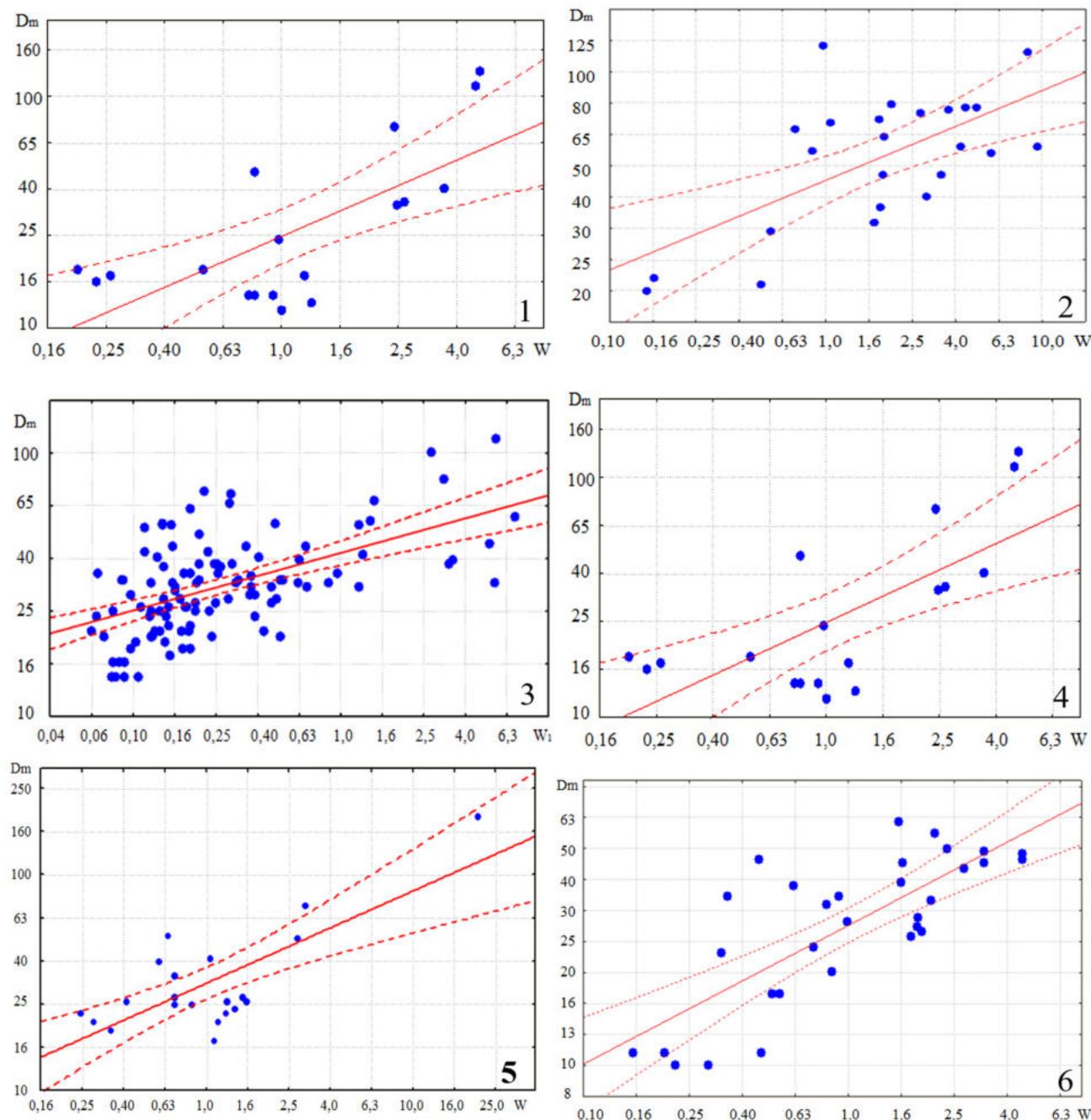


Рисунок 1 – Зависимость межлиночных интервалов (D_m , сутки) от массы тела (W , г) перед предыдущей линькой у мраморного рака в различных температурных интервалах: 1. 15,3-17,1 °C; 2. 17,5-18,9 °C; 3. 19,1-20,8 °C; 4. 21,0-22,8 °C; 5. 22,9-25,2 °C; 6. 25,3-28,9 °C

В связи с значительными диапазонами изменений W обе шкалы представлены в логарифмических координатах. Прямые – линии регрессии уравнения (2), пунктир - уровень значимости 95 %.

Соотношение между массой тела у особей после последующей (W_{i+1} , г) и предыдущей (W_i , г) во всех сериях экспериментов изменялись в очень широких пределах (рисунок 2). Однако статистически значимых различий между любыми парами сравнений в сериях установлены не были (во всех случаях $p > 0,1$).

Среднее значение W_{i+1}/W_i для всех полученных нами данных составило 1,34. Этот показатель соответствует таковому для многих видов речных раков. Например, у широкопалого рака *Astacus astacus* он составлял 1,43 (Голубев, Улащик, 2022) [1].

Для особей из разных температурных интервалов, номера которых соответствуют таковым на рисунке 1. Кружки – среднее значение, прямоугольники – ошибка средней, усы – стандартное отклонение.

Для нахождения нижних температурных пределов протекания линек целей определена связь между частотой линек ($1/D_m$, сутки⁻¹) и средней температурой (t , °C) у особей *P. virginalis* из пяти размерных групп – 0,2 г, 0,5 г, 1,0 г, 1,5 г и 3,0 г (рисунок 3). Первые две группы представляют ювенильных особей, две последующих – особи, достигшие половой зрелости, но производившие чаще всего абортивные кладки. Особи пятой, самой крупной размерной группы уже начинают производить жизнеспособные кладки.

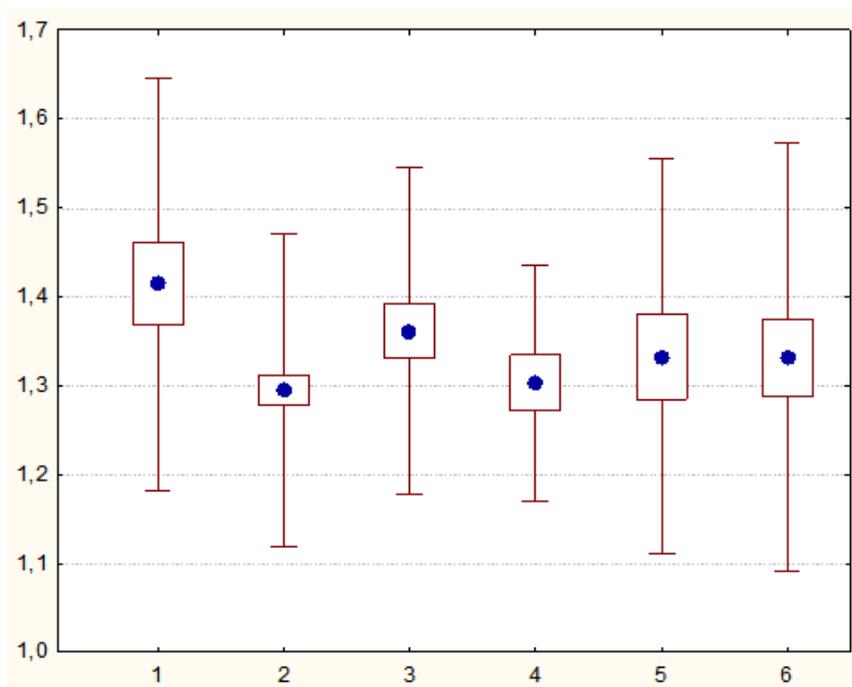


Рисунок 2 – Изменение соотношения между массой тела особей после последующей (W_{i+1}) и предыдущей (W_i) линек

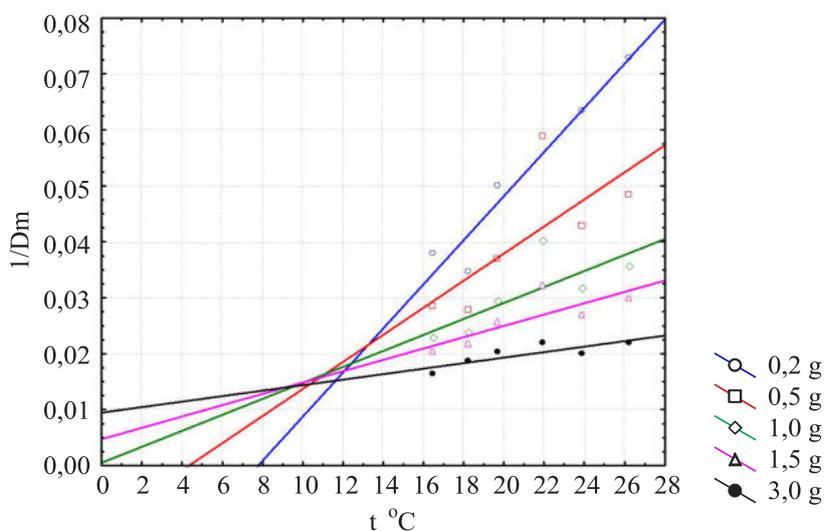


Рисунок 3 – Соотношения частоты линек ($1/D_m$, сутки⁻¹) от средней температуры (t , °C) у особей *P. virginalis* из пяти размерных групп: 0,2 г, 0,5 г, 1,0 г, 1,5 г и 3,0 г

Видно, что температура биологического нуля для $1/D_m$ для ювенильных особей *P. virginalis* (4 – 8 °C) существенно выше, чем для более крупных размножающихся (около 0 °C). Следовательно, по нашим данным особи данного вида могут линять, т.е. расти при температурах ниже 8 °C, что подтверждается и данными других авторов. Так, в экспериментах, проведенных в Эстонии с половозрелыми самками *P. virginalis*, содержащихся зимой в емкости на открытом воздухе, по меньшей мере, одна особь облиняла за 30-дневный период, когда температура воды изменялась в пределах 5,1 – 9,5°C (Kaldre, 2018) [4].

Значения температурного коэффициента Вант-Гоффа (Q_{10}) в интервале 16,5 – 26,2 °C для величин $1/D_m$ снижаются с увеличением массы особей (рисунок 4). Следовательно, по мере увеличения массы *P. virginalis* влияние повышения температуры на скорость соматического роста этого вида снижается.

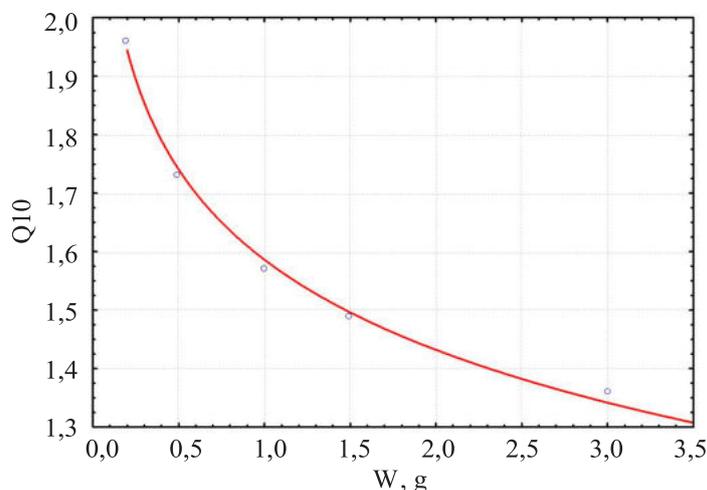


Рисунок 4 – Значения температурного коэффициента Вант-Гоффа (Q_{10}) в интервале 16,5 – 26,2 °C для *P. virginalis*

Заключение. С увеличением массы особи увеличивается длина межлиночного интервала. Так как рост рака напрямую зависит от процесса линьки, то на основе полученных данных можно разработать рекомендации по прогнозированию потенциальных возможностей роста *P. virginalis* в условиях непрерывного выращивания. Также для прогнозирования процессов роста у реальных и потенциальных инвазивных видов десятиногих раков за пределами их материнских ареалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев, А. П., Улащик, Е. А. Математическое моделирование процессов непрерывного роста широкопалого рака *Astacus Astacus* (Decapoda, Astacidae) в условиях аквакультуры / А. П. Голубев, Е. А. Улащик // Актуальные проблемы охраны животного мира в Беларуси и сопредельных регионах : материалы II Международной научно-практической конференции, Минск, 11–14 октября 2022 г., г. Минск, Республика Беларусь / Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам»; ред. колл. : А.В. Кулак [и др.]. – Минск : А. Н. Вараксин, 2022. – С. 106–112.
2. Kouba, A. Continental-wide distribution of crayfish species in Europe: update and maps / A. Kouba, A. Petrusek, P. Kozák // Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems. – 2014. – Vol. 413, N 5. – p.31. <https://doi.org/10.1051/kmae/2014007>.
3. Хмелева Н.Н., Голубев А.П. Продукция кормовых и промысловых ракообразных. Минск: Наука и техника. 1984. – 216 с.
4. Kaldre, K. Invasive non-indigenous crayfish species as a threat to the noble crayfish (*Astacus astacus* L.) populations in Estonia / K. Kaldre // A thesis for application for the degree of Doctor of Philosophy in Agricultural Sciences. – 2018. – 124 p.