

АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ БИОМОНИТОРИНГА ВОДНОЙ СРЕДЫ В ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ

В.Ю. Журавский, Е.Н. Воскресенская, В.В. Трусевич, А.С. Лубков

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: vectorj@mail.ru

В работе исследованы поведенческие реакции двухстворчатых черноморских моллюсков на основе данных наблюдений, полученных с помощью комплекса мониторинга водной среды. Методом спектрального анализа обнаружена ярко выраженная 24-часовая периодичность активности мидий. Выявлено, что в дневное время для моллюсков характерны более частые короткие схлопывания (аддукции), чем в ночное время. Ночью количество средних и длинных аддукций увеличивается на 30% по сравнению с дневным временем. Выявлено, что ночью положение раскрытых створок моллюсков обычно соответствует 80–95%, а днем – 50–75%.

Ключевые слова: двухстворчатые моллюски, черноморские мидии, биомониторинг

Поступила в редакцию: 16.09.2019. После доработки: 29.10.2019.

Введение. В последние несколько десятилетий наблюдается устойчивое увеличение антропогенной нагрузки как на морскую среду, так и на пресноводные водоемы. В этой связи актуализируется необходимость мониторинга экологического состояния водоемов. В настоящее время для мониторинга состояния водоемов наиболее распространено используется два подхода. Первый подход основан на разработке и применении специализированных датчиков. Такие датчики избирательно реагируют на содержание тех или иных химических веществ, к тому же использования таких датчиков не позволяют оперативно выявить внезапные выбросы загрязнений. Второй подход основан на использовании в качестве датчиков живых организмов. Такие датчики основаны на изменении поведенческих реакций живых существ при воздействии на них различных химических и отравляющих веществ [1, 2]. Такой подход является более дешевым и комплексным по сравнению с первым. Он, в то же время, дает возможность оценивать состояние биоты водной среды. В этой связи этот подход представляет большой интерес для изучения и последующего практического использования.

В качестве датчиков для обнаружения естественных или антропогенных загрязнений водной среды используют региональный биологический материал, приспособленный к жизни в воде, в частности, такие организмы, как рыбы, некоторые насекомые, моллюски (мидии, устрицы), водоросли, зоопланктон и бактерии [3, 4]. Есть пример успешного применения биологических организмов для мониторинга за качеством пресной воды, поступающей на нужды населения г. Санкт-Петербург. В качестве экспериментальных образцов ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» были использованы 6 раков *pontastacus leptodactylus*, при этом изменение качества воды определялось на основе кардиоритма организмов [5]. Однако в работах [4, 6] показано, что наиболее дешевыми и надежными организмами для детектирования загрязнений водной акватории являются двухстворчатые моллюски. В работе [7] испанскими и канадскими специалистами проводились практические испытания биометрического прибора с использованием двухстворчатых моллюсков в естественной среде обитания в лимане Рия де Ароуса, Испания. В этом эксперименте было выявлено, что в жизнедеятельности моллюсков существует два выра-

женных пика: суточный и приливный. При этом моллюски, которые были расположены ближе к поверхности воды, имеют выраженную суточную периодичность, в то время как один моллюск, расположенный на глубине более 7 м, был более чувствительным, очевидно, к приливному пику, равному 12,6 ч.

Для черноморского региона вполне пригодны в качестве индикаторов такие моллюски как мидии. Очень важно отбирать аборигенные организмы в регионах, нуждающихся в мониторинге загрязнений водной среды [1]. Это связано с тем, что в каждом таком регионе организмы вырабатывают устойчивые поведенческие реакции, характерные именно для этой локации.

В настоящее время в Институте природно-технических систем (ИПТС) проводятся исследования поведенческих реакций мидий, используемых в автоматизированном экспериментальном образце комплекса мониторинга водной среды (КМВС), впервые разработанном для Черноморского региона [1, 8–10]. Этот комплекс основан на наблюдении поведенческих реакций 14 черноморских двустворчатых моллюсков – мидий. Используя датчик Холла и магнит, КМВС получает информацию о состоянии раскрытия створок мидий и в режиме реального времени передает эти данные на сервер ИПТС. В случае наступления опасных или непригодных для обычной жизнедеятельности условий при загрязнении контролируемого водного объекта, мидии изменяют ритмику движения створок или захлопываются. В закрытом положении они остаются длительное время, пока вода не очистится.

Для качественного мониторинга экологической обстановки водной среды важно понимать биологические ритмы мидий в нормальных условиях. Отклонение поведения мидий от естественных ритмов жизнедеятельности в текущей работе будем называть «Экологической тревогой». В ходе мониторинга состояния водной среды важно своевременно и качественно анализировать большие

объемы полученных данных. На сегодня для КМВС существует программное обеспечение для визуализации первичных данных [8], ряды которых контролируются экспертом. Эксперт принимает решение о наличии или отсутствии «Экологической тревоги». Для автоматизации процесса мониторинга и исключения человеческого фактора при принятии решений об экологических тревогах, следует разработать программный комплекс статистической обработки данных. Это возможно осуществлять при детальном изучении биоритмов черноморских двустворчатых моллюсков.

Таким образом, цель настоящей работы – разработка специализированного программного комплекса для автоматического мониторинга экологической обстановки водной среды и своевременного выявления тревоги. Для осуществления поставленной цели в текущей работе решались следующие задачи: выявить неисправные датчики, расположенные на моллюсках, и/или моллюсков с прерванной жизнедеятельностью (отмерших мидий); подтвердить статистически различие физической активности мидий в течение суток; получить количественные оценки разницы состояния раскрытия створок моллюсков и амплитуды схлопывания створок (аддукций) ночью и днем.

Данные и методика. В работе, в качестве примера, использовались данные о раскрытии створок моллюсков с прибора, установленного на морском шельфе Севастопольского региона, за период с 20.04.2012 по 17.05.2012, наиболее обеспеченный данными непрерывных наблюдений. Эти данные представляют собой текстовый файл, содержащий информацию об уровне раскрытия каждой мидии (в миллиметрах) из четырнадцати моллюсков с временным шагом в одну минуту.

Во временном ходе рядов данных, полученных с КМВО, наблюдается наличие восходящего линейного тренда. Поскольку анализируемый ряд данных был взят за период активного прогрева

воды (вторая половина весны), такой тренд может быть связан с изменением поведения моллюсков или/и реакцией прибора на изменение температуры. В связи с этим был рассчитан и исключен из рядов линейный тренд.

Для каждого моллюска в отдельности характерна индивидуальная максимальная амплитуда раскрытия створок. В связи с этим производился перевод величины раскрытия мидии, выраженной в миллиметрах, в проценты, где 100% – ее максимальная величина раскрытия.

Для выявления неисправных датчиков, расположенных на моллюсках, и моллюсков с прерванной жизнедеятельностью, проводилась их классификация на основе кластерного анализа. Задача кластерного анализа состоит в объективном разбиении на классы, свободном от субъективизма исследователя [11]. В нашей работе использован иерархический кластерный анализ методом Варда, суть которого состоит в последовательном объединении или разделении больших кластеров на малые, мерой связи между которыми было выбрано Эвклидово расстояние, определяемое по формуле

$$d_{E,y} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2},$$

где x_{ik} и x_{jk} значения k -й переменной на i -м и j -м расстоянии, m – число характеристик. В результате проделанного кластерного анализа ожидается выделение рабочей группы моллюсков.

Далее проводился спектральный анализ, который показал наличие суточного ритма черноморских мидий, в связи с чем возникла необходимость отдельного рассмотрения дневных и ночных биоритмов. Для этого было вычислено время заката и рассвета на широте и долготе размещения прибора, с последующим разделением рядов данных на дневное и ночное время суток.

Все статистические методы, примененные в данной работе, были написаны на скриптовом языке программирования

R. В работе использовались следующие библиотеки R: BasicTrendline [12] – библиотека для расчета коэффициентов линейного тренда; cluster [13] – библиотека иерархического кластерного анализа; и solartime [14] – библиотека для вычисления времени заката и рассвета в заданных координатах.

Результаты и обсуждения. В анализируемых рядах наблюдений кластерным анализом было выявлено несколько групп моллюсков, имеющих характерные особенности. Первую группу составили 10 моллюсков (рис. 1). Для этой группы характерно движение створок, имеющие регулярную ритмику (рис. 2 а). В три другие группы вошли 4 оставшиеся моллюска, поведение которых существенно отличается от первой группы. Поведение моллюсков № 4 и № 5 может быть связано с некорректной работой закрепленных на них датчиков (рис. 2 б). Моллюски № 6 и № 11 перестали реагировать на внешние раздражители, и более половины времени эксперимента не проявляли никакой активности (рис. 2 в).

В связи с тем, что поведение моллюсков внутри первой подгруппы имеют несущественные различия друг с другом, далее будем рассматривать только ее.

Для определения периодов биологической активности моллюсков был применен спектральный анализ, рассчитанный на основе среднего арифметического амплитуды створок раскрытия моллюсков группы 1, в результате которого был выявлен значимый максимум спектральной плотности ($\alpha < 0,001$), имеющих период в 24 ч. Стоит отметить, что этот же 24-часовой период выделяется при проведении анализа для каждого отдельно взятого моллюска.

В связи с выделением ярко выраженного суточного периода была проанализирована активность моллюсков в различное время суток. На рис. 3 показана среднесуточная активность моллюсков в течение 27 дней. Отмечено, что ночью положение раскрытых створок моллюсков чаще всего соответствует уровню 80–95%, а днем – 50–75%.

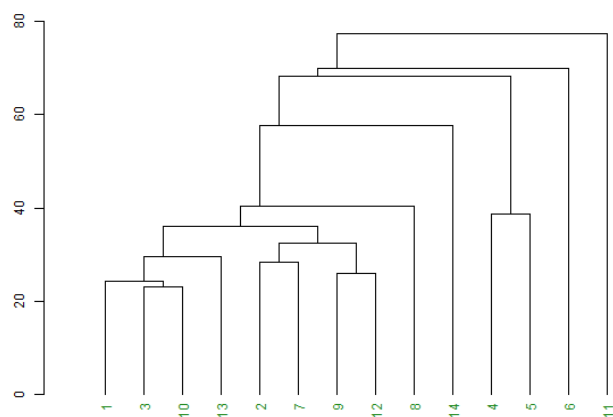


Рис. 1. Дендограмма иерархического кластерного анализа для 14 черноморских мидий
Fig. 1. Dendrogram of hierarchical cluster analysis for 14 Black Sea mussels

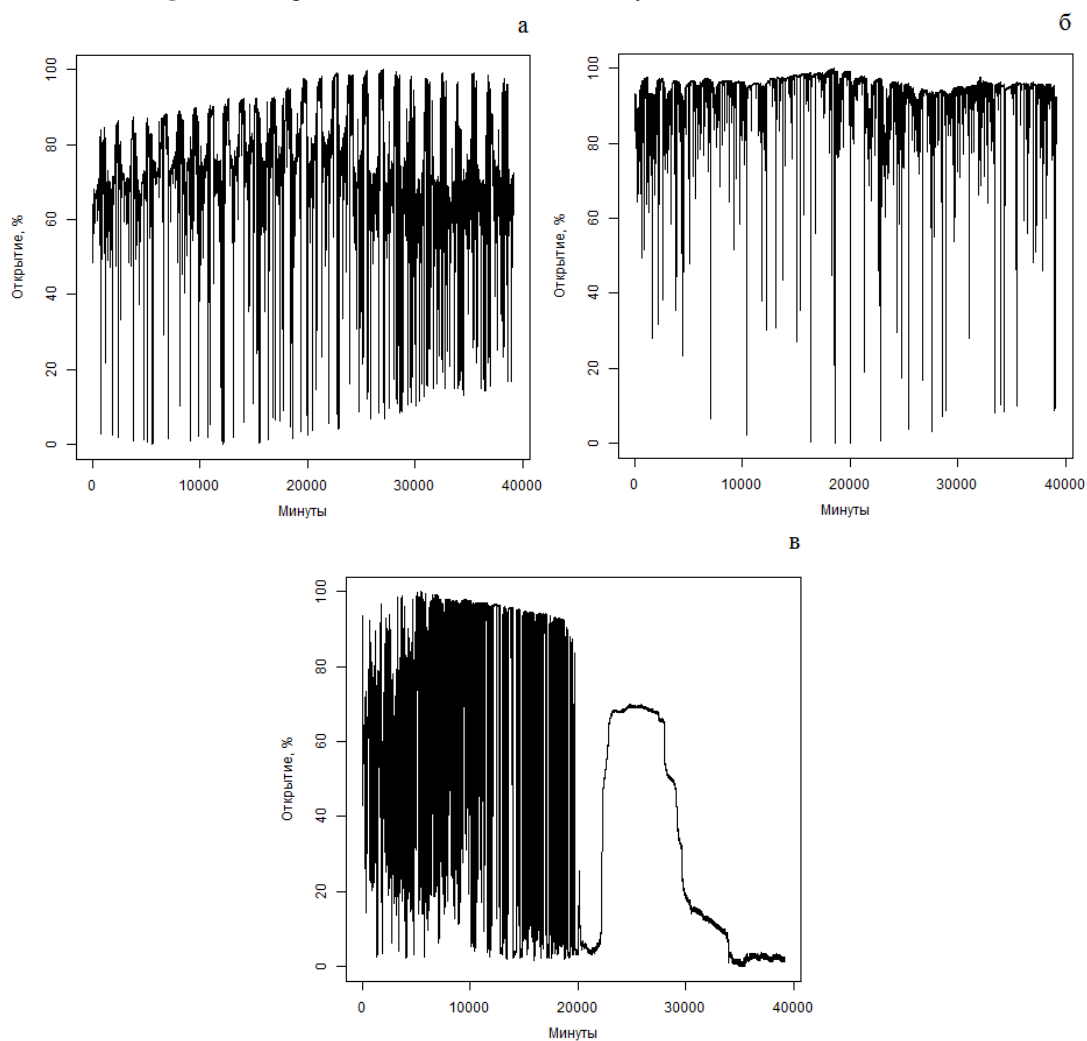


Рис. 2. Временной ход движения створок моллюсков: а) № 10; б) № 4; в) № 6
Fig. 2. Time course of the movement of mollusk flaps: а) № 10; б) № 4; в) № 6

В связи с выделением ярко выраженного суточного периода была проанализирована активность моллюсков в различное время суток. На рис. 3 а показана среднесуточная активность моллюсков в течение 27 дней. Отмечено, что

ночью положение раскрытых створок моллюсков чаще всего соответствует уровню 80–95%, а днем – 50–75%.

Из приведенной на рис. 3 б иллюстрации можно заключить, что для моллюсков характерны более частые корот-

кие аддукции днем, причем количество этих аддукций до полутора раз выше, чем ночью. В то же время, ночью увеличивается количество средних и длинных аддукций на 30% по сравнению с дневным периодом. Быстрые – длинные и короткие аддукции обеспечивают в основном процессы выведения из организма продуктов метаболизма в соответствии с функционированием выводящего

сифона. Короткие неглубокие колебания, занимающие основную часть дневного периода, обеспечивают осуществление процессов фильтрации и дыхания. Приуроченность длинных аддукций к ночному периоду суточного цикла свидетельствует о преимущественном интенсивном питании моллюсков в ночное время. В дневное время мидии практически не питаются.

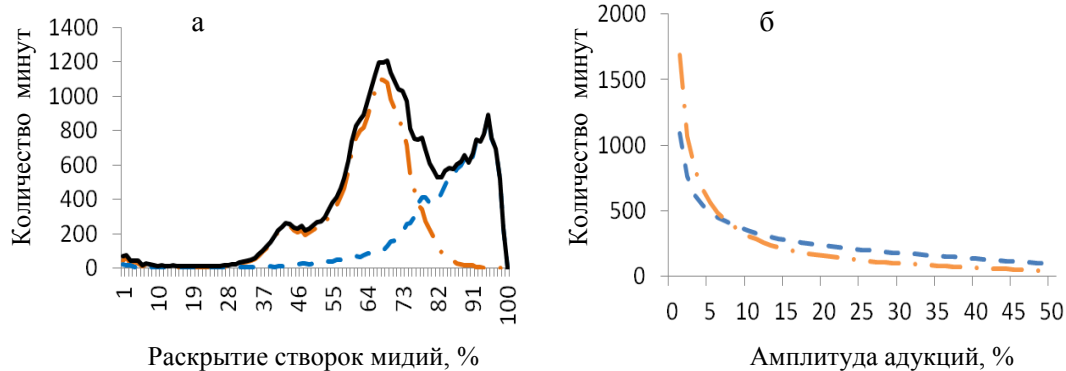


Рис. 3. а – зависимость повторяемости уровня раскрытия мидий (ось ординат) от амплитуды раскрытия, выраженной в процентах (ось абсцисс) ночью (синий штрих), днем (оранжевый штрих пунктир), суточная (черная сплошная линия); б – зависимость количества аддукции от их амплитуды ночью (синий штрих) и днем (оранжевый штрих пунктир)

Fig. 3. а – dependence of the frequency of mussel disclosure (ordinate axis) on the disclosure amplitude expressed as a percentage (abscissa axis) at night (blue dashed line), during the day (orange dash-dotted line), daily (black solid line); б – dependence of the amount of adduct on their amplitude at night (blue dashed line) and during the day (orange dash-dotted line)

Выводы. Для реализации эффективного мониторинга водной среды были изучены закономерности биологических ритмов черноморских мидий.

Используя кластерный анализ, были отфильтрованы некорректно работающие датчики прибора. Далее были установлены следующие закономерности в ритмике жизнедеятельности изучаемых моллюсков.

С помощью спектрального анализа показано наличие типичного значимого ($\alpha < 0,001$) временного периода, равного 24 ч, а затем показано различие активности моллюсков в дневное и ночное время. Определено, что в дневное время для моллюсков характерны более частые короткие аддукции, чем в ночное время, что можно объяснить осуществлением процессов фильтрации и дыхания. Ночью же, количество средних и длинных аддукций выше на 30% чем днем, что объясняется более активными процессами

метаболизма. Выявлено, что ночью положение раскрытых створок моллюсков обычно соответствует 80–95%, а днем – 50–75%.

Полученный результат можно использовать для создания программного статистического комплекса выявления экологических сигналов тревог.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 18-45-920061 p_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трусевич В.В., Гайский П.В., Кузьмин К.А. Автоматический биомониторинг водной среды с использованием реакции двустворчатых моллюсков // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 3. С. 75–83.
2. Allen H.J., Waller T.W., Kennedy J. et al. Real-time whole organisms biomoni-

toring – deployment, status, and future // AWWRA. Annual spring speciality conference proceedings. Middleburg. 2001. P. 187–192.

3. Baldwin I.G., Kramer K.I.M. Biological early warning systems (BEWS) // Bio-monitoring of coastal waters and estuaries / ed. K.I.M. Kramer. CRC Press: Boca Raton. 1994. P. 1–28.

4. Gruber D., Frago e.H., Rasnake W.I. Automated biomonitoring—first line of defence // Aquat. Ecosyst. Health. 1994. Vol. 3. P. 87–92.

5. Кузнецова Т.В., Сладкова Г.В., Холодкевич С.В. Оценка функционального состояния раков *portastacus leptodactylus* в нормальной и токсической среде по характеристикам их кардиоактивности и биохимическим показателям гемолимфы // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2010. № 46 (3). С. 203–210.

6. Kramer K.J.M., Foekema E.M. The "Musselmonitor@" as biological early warning system // Biomonitoring and Biomarkers as Indicators of Environmental Change: A Handbook. 2000. Vol. 2. P. 59–87.

7. Comeau L.A., Babarro J.M.F., Longac A., Padinb X.A. Valve-gaping behavior of raft-cultivated mussels in the Rna de Arousa, Spain // Aquaculture Reports. 2018. Vol. 9, February. P. 68–73.

8. Гайский П.В., Трусевич В.В., Забурдаев В.И. Автоматический биоэлектронный комплекс, предназначенный для раннего обнаружения отравляющих загрязнений пресных и морских вод // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 2. С. 44–53.

9. Биомаркеры поведенческих реакций черноморской мидии для автоматизированного биомониторинга экологического состояния водной среды / В.В. Трусевич, П.В. Гайский, К.А. Кузьмин [и др.] // Системы контроля окружающей среды. 2015. № 1 (21). С. 13–18.

10. Трусевич В.В., Мишууров В.Ж., Кузьмин К.А. Система непрерывного автоматизированного в реальном времени контроля качества воды и предупреждения об угрозах экологической опасности на водозаборах городского водоснабжения // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018: сборник статей по материалам междунар. науч.-практ. конф. (Севастополь, 24–27 сентября 2018 г.). Севастополь. 2018. С. 1177–1181.

11. Орлов А.И. Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс. 2004. 513 с.

12. Weiping M., Guangchuang Y., Jiangshan L. Package 'basicTrendline' // R-project. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/basicTrendline/basicTrendline.pdf> (дата обращения: 05.09.2019).

13. Martin M., Peter R., Anja S. Package 'cluster' // R-project. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/cluster/cluster.pdf> (дата обращения: 05.09.2019).

14. Thomas W. Package 'solartime' // R-project. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/solartime/solartime.pdf> (дата обращения: 05.09.2019).

DATA ANALYSIS FOR AUTOMATION OF AQUATIC BIOMONITORING IN THE BLACK SEA REGION

V.Y. Zhuravsky, E.N. Voskresenskaya, V.V. Trusevich, A.S. Lubkov

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

Behavioral reactions of bivalve Black Sea mollusks is studied in the work using data of observations from aquatic environmental monitoring complex Spectral analysis shows a pronounced 24-hour periodicity of mussel activity. It was revealed that in the daytime, mollusks are characterized by more frequent short adductions than at night. It was shown that during nights, the number of medium and long adductions increases by 30% compared to daytime. It was found, that the position of the open shells of mollusks usually corresponds to 80–95% at night, while during the daytime it reaches of 50–75%.

Keywords: bivalve mollusks, Black Sea mussels, biomonitoring, environmental monitoring.