

ПЕРЕДНИЕ ГОЛЕНИ ЖУКА-НОСОРОГА ОБЫКНОВЕННОГО (*ORYCTES NASICORNIS* (LINNAEUS, 1758)) КАК БИОНИЧЕСКИЙ ПРОТОТИП ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРЕЛЬЧАТЫХ ЛАП КУЛЬТИВАТОРОВ

О. В. СИНЧУК¹⁾, Д. Г. ЖОРОВ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Рассмотрены основные принципы бионического моделирования и проектирования как важной части экологического знания. Указана важность использования бионического дизайна в качестве регенеративного подхода в проектировании деталей и их отдельных элементов. Подчеркивается значимость использования природных объектов для создания принципиально новых технических решений и адаптации отдельных элементов в уже созданные технологии в сельском хозяйстве. Приводятся сведения о возможности использования голеней жука-носорога обыкновенного (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758)) для бионического моделирования стрельчатых лап культиваторов. С этой целью рассмотрены части насекомого – передние голени, которые испытывают наибольшую нагрузку при движении в органическом субстрате растительного происхождения или формирующейся почвенной среде. Выбор бионического аналога обусловлен подобием выполняемых функций и износостойкостью. При этом приведены сведения о механике перемещения насекомого и некоторых особенностях биологии. Рассмотрены уникальные морфологические особенности голени жука-носорога, в частности их адаптированная форма и функциональные характеристики. Указывается наличие у рабочей части голеней закругленных к вершине зубцов. В пространстве между зубцами имеются округлые, уплощенные к краю выемки. Электронная сканирующая микроскопия позволила установить скульптуру поверхности зубчатого края голеней. Морфология поверхности рабочей части голени имеет пористое строение. Отдельные линии формируют извитые каналы различной глубины. Анализ элементного состава позволил выявить наличие алюминия в структуре внешнего скелета зубчатого края голеней. Для объективной оценки и разработки наиболее эффективных технологических решений предлагается проанализировать аналогичные части ног представителей семейства Scarabaeidae. По результатам исследований выдвигается гипотеза по использованию зубчатого края голеней жука-носорога при проектировании стрельчатых лап культиваторов, путем создания наплавки или накладок из износостойких материалов на рабочую поверхность. При этом общая структура голени может служить объектом для адаптации и создания принципиально новых решений в земледельческой механике, характеризуясь при этом высокой эффективностью, износостойкостью и экологичностью.

Ключевые слова: бионика; экоинновации; земледельческая механика; прикладная биология; сельское хозяйство; Scarabaeidae.

Образец цитирования:

Синчук ОВ, Жоров ДГ. Передние голени жука-носорога обыкновенного (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758)) как бионический прототип для моделирования стрельчатых лап культиваторов. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2024;2:15–23.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2-15-23>

For citation:

Sinchuk AV, Zhorov DG. The front tibia of the european rhinoceros beetle (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758)) as a bionic prototype for modeling the row crop cultivator sweep. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2024;2:15–23. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2-15-23>

Авторы:

Олег Викторович Синчук – старший преподаватель кафедры физической географии мира и образовательных технологий, факультет географии и геоинформатики; координатор межкафедрального центра – кафедры ЮНЕСКО по естественнонаучному образованию.

Дмитрий Георгиевич Жоров – кандидат биологических наук, доцент кафедры физической географии мира и образовательных технологий, факультет географии и геоинформатики; заместитель начальника Главного управления науки – начальник отдела аспирантуры и докторантуры.

Authors:

Aleh V. Sinchuk, senior lecturer at the department of physical geography of the world and educational technologies, faculty of geography and geoinformatics; co-coordinator UNESCO department in science education with emphasis on natural sciences.

aleh.sinchuk@gmail.com

Dmitrii G. Zhorov, PhD (biology), associate professor at the department of physical geography of the world and educational technologies, faculty of geography and geoinformatics; deputy head of the General directorate of science – head of the department of postgraduate and doctoral studies.

dmitrii.zhorov.89@mail.ru

Благодарность. Исследования проводились в рамках выполнения НИР «Исследование износостойких биоинспирированных рабочих поверхностей стрелчатых лап культиваторов для ухода за посадками овощных культур» ГПНИ «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность». Авторы приносят благодарность Центру коллективного пользования уникальным научным оборудованием «Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований» физического факультета БГУ и лично ведущему инженеру радиационной и вакуумной аппаратуры сектора обслуживания научных исследований С. В. Гусаковой за оказанную помощь в проведении исследований методами электронной микроскопии.

THE FRONT TIBIA OF THE EUROPEAN RHINOCEROS BEETLE (*ORYCTES NASICORNIS* (LINNAEUS, 1758) AS A BIONIC PROTOTYPE FOR MODELING THE ROW CROP CULTIVATOR SWEEP

A. V. SINCHUK^a, D. G. ZHOROV^a

^aBelarusian State University,
4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus
Corresponding author: A. V. Sinchuk (aleh.sinchuk@gmail.com)

The basic principles of bionic modeling and design as an important part of ecological knowledge are considered. The importance of using bionic design as a regenerative approach in the design of parts and their individual elements is pointed out. The importance of using natural objects to create fundamentally new technical solutions and adaptation of individual elements into already created technologies in agriculture is emphasized. Information is given about the possibility of using the tibiae of the european rhinoceros beetle (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) for bionic modeling of lancet legs of cultivators. For this purpose, the parts of the insect – the anterior tibiae, which experience the greatest load during movement in organic substrate of plant origin or forming soil environment, were considered. A bionic analog was chosen due to the similarity of the functions performed and wear resistance. Information on the mechanics of insect movement and some peculiarities of biology is given. The unique morphological features of rhinoceros beetle tibiae are considered, in particular, their adapted form and functional characteristics. The presence of teeth rounded to the apex at the working part of the tibia is indicated. In the space between the teeth there are rounded, flattened to the edge notches. Electron scanning microscopy allowed to establish the sculpture of the surface of the serrated edge of the tibiae. The morphology of the surface of the working part of the tibiae has a porous structure. Individual lines form tortuous tubules of different depth. The analysis of elemental composition allowed to reveal the presence of aluminum in the structure of the external skeleton of the dentary edge of the tibiae. For an objective assessment and development of the most effective technological solutions, it is proposed to analyze similar parts of the legs of representatives of the family Scarabaeidae. Based on the results of the research, a hypothesis is put forward to use the serrated edge of the tibiae of the rhinoceros beetle in the design of lancet feet of cultivators, by creating cladding or overlays of wear-resistant materials on the working surface. In this case, the general structure of the tibia can serve as an object for adaptation and creation of fundamentally new solutions in agricultural mechanics, characterized by high efficiency, wear resistance and environmental friendliness.

Keywords: bionics; eco-innovation; agricultural mechanics; applied biology; agriculture; Scarabaeidae.

Aknowledgements. The research was carried out within the framework of the research work «Study of wear-resistant bioinspired working surfaces of the row crop cultivator sweep for planting vegetable crops» State Research Program «Agricultural Technologies and Food Security». The authors are grateful to the Center for Collective Use of Unique Scientific Equipment «Belarusian Interuniversity Research Service Center» of the BSU Faculty of Physics and personally to the leading engineer of radiation and vacuum equipment of the research service sector S. V. Gusakova for her assistance in conducting research by electron microscopy methods.

Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется развитию бионических исследований [1]. Принципы и подходы бионического проектирования направлены на содействие как существующих целей устойчивого развития, так и возникающих целей регенеративного дизайна [2]. В качестве альтернативы разрушающим экосистемы технологиям индустриальной эпохи появляются экологические подходы к технологиям и инновациям, которым на протяжении уже многих лет уделяется все больше внимания [3]. Бионика является примером такого экологического подхода к технологиям и инновациям, к которой прибегают ученые, изучая устройство природных систем и затем имитируя эти конструкции для решения хозяйственно важных проблем и задач [4–6]. Природа рассматривается здесь как вдохновляющий источник знаний, который позволяет создавать технологические инновации, созданные природой. По мнению

Дж. М. Беньюса, «гармония рука об руку» идет с природными системами, в которой «организмы приспосабливаются к своему местообитанию и друг к другу» [7], что является главным уроком, который мы можем извлечь из природы и который может стать вдохновением для будущих экологических разработок и более надежных технологий и инноваций [3].

Современная практика бионики включает три ключевых уровня [2; 8]. Первый уровень бионики стремится к имитации естественной формы (бионическое подобие) [9]. Второй уровень исследует биологические процессы и то, как их можно имитировать в дизайне и инженерии [10; 11]. Третий – может возникать на системном уровне, когда исследования сосредотачиваются на принципах, моделях и стратегиях, принятых в экосистемах [9]. Многие исследователи подчеркивают возможность перехода к практике бионики на уровне экосистемы [9; 12; 13], отмечая, что подходы на уровне формы и процесса не обязательно приводят к разработке устойчивого решения, особенно с учетом склонности к подражанию некоторым избранным чертам конкретного организма. Вместо этого они предлагают более целостную интерпретацию и практику бионики, которая рассматривает применение бионических решений в различных пространственных, временных и организационных масштабах [13–15]. В связи с чем рассматривается не только бионическое подобие отдельных органов, но и их функциональное назначение, механика и структура.

С учетом указанных подходов бионическое проектирование широко применяются при разработке конструктивных схем и обосновании параметров различных сельскохозяйственных и почвообрабатывающих машин [16; 17]. В качестве бионических прототипов могут выступать различные почвенные животные: их форма тела, отдельные части и даже целые органы [16–19]. Использование почвенных животных в качестве бионического прототипа связано с их антиадгезионными способностями и функциями снижения сопротивления в эдафической среде. Они также характеризуются исключительными и идеальными механизмами борьбы с прилипанием различных веществ к их телам [19].

В качестве бионических моделей при проектировании стрельчатых лап культиваторов рассматриваются мандибулы черного садового муравья (*Lasius niger* (Linnaeus, 1758) [20; 21], копательные щетинки обыкновенного муравьиного льва (*Myrmeleon formicarius* Linnaeus, 1767) [22]. Также нами предполагается возможность использования для этих целей голеней жука-носорога обыкновенного (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758).

Жук-носорог обыкновенный – представитель отряда жесткокрылые (Coleoptera), характеризующийся наличием копательных голеней передних ног, которые можно использовать в качестве прототипа для бионического моделирования в земледельческой механике.

O. nasicornis – жесткокрылое насекомое западно-палеарктического ареала [23], широко распространенный по территории Южной и Центральной Европы, Северной Африки. Вид также отмечается в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России. В процессе случайной интродукции человеком жук-носорог обыкновенный постепенно изменяет (в сторону расширения) свою северную и восточную границу ареала [23–26]. Жук-носорог обыкновенный может выступать как синантроп, используя для развития личинок места скопления разлагающихся растительных остатков (парники, компосты, навозные кучи и т. д.) [23; 24; 27; 28]. *O. nasicornis* относится к числу наиболее крупных, достигая в длину более 4 см, видов жесткокрылых фауны Беларуси [29]. Предпочитает заселять увлажненные участки, долины, речные поймы. В условиях нашей страны вид встречается повсеместно.

Личинки *O. nasicornis* являются ксилофагами и сапрофагами – питаются разрушающимися древесиной и другими растительными остатками. Развитие личинки составляет 2–4 года. Взрослые жуки отмечаются рядом с местами развития личинок. Днем жуки обычно малоактивные, не летают и скрываются на земле, в дуплах деревьев. Активность начинается в сумерках и с наступлением полной темноты, продолжаясь почти всю ночь. Взрослые жуки живут 1–2 месяца. Жуки летают с весны до середины лета, иногда до начала осени. Для яйцекладки самка зарывается в дупла деревьев (береста, дуба, ивы и других пород), а также в перепревший навоз, мусорные кучи, кучи из стружек и опилок.

Тело насекомого умеренно продолговатое, выпуклое, довольно широкое. Имаго блестящее, темно-буро-красного цвета. Голова небольшая. Наличник имеет треугольную форму, с почти прямыми боками. У самцов большая часть головы занята рогом, который постепенно утончается по направлению к вершине, имеет трехгранное сечение, равномерно изогнут и направлен от самого основания вверх и назад. У самок рог развит слабо. Самцы длиной 26–43 мм, шириной – 13,5–21,3 мм; самки длиной – 26–41 мм, шириной – 13–21 мм [23].

Поисковые исследования существующих биологических прототипов животных-землероев показали, что особого внимания заслуживает обоснование параметров передних голеней жука-носорога обыкновенного. Он послужил основой для бионического проектирования ротационного рыхлителя почвы [30], кольчато-режущего почвообрабатывающего катка [31], s-образной стойки с регулируемой жесткостью культиватора-плоскореза и др. [32].

Целью настоящего исследования является всестороннее изучение голеней передних конечностей *O. nasicornis* для использования их в качестве бионического прототипа для проектирования стрелчатых лап культиваторов.

Материалы и методы исследования

В основу настоящей работы положены сборы имаго *Oryctes nasicornis*, проведенные в 2021–2022 гг. (leg. A. V. Sinchuk) на территории Беларуси. Идентификация видовой принадлежности материала осуществлялась с использованием специализированных определителей [23; 33; 34] под стереомикроскопом МБС-10 и тринокулярном микроскопе Optec SZ780, снабженном цифровой камерой Canon 1100d.

Собранных насекомых помещали в пластиковые и стеклянные емкости различного объема, а затем фиксировали в 40–96 % растворе этилового спирта. Далее насекомых препарировали с целью изучения их передних ног. Съемку голеней передних ног жука-носорога осуществляли с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO – 1455 VP (с приставками) на базе Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием «Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований» физического факультета БГУ.

Измерения проводились при помощи свободного программного обеспечения ImageJ. В работе приводятся значения: минимум – максимум, средняя арифметическая с доверительным интервалом – стандартной ошибкой.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования существующих бионических прототипов животных, обитающих в почве, показали, что особое внимание заслуживает изучение передних ног жука-носорога обыкновенного как возможной части для создания различных по функциям почвообрабатывающих органов.

Ноги взрослого жука сильные, но не длинные. Голени (рис. 1 а, б) передних ног широкие, снаружи с тремя широкими, притупленными на концах зубцами, разделенными закругленными выемками, причем средний зубец заметно приближен к вершинному, на вершинном крае, против заднего края среднего зубца, с сильно прямой шпорой, снизу без зубца.



Рис. 1. Голень передней ноги *Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758): вид сверху (а), вид снизу (б)

Fig. 1. Tibia of the front leg of *Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758): dorsal view (а), ventral view (б)

Голени передних ног жука-носорога выполняют копательную функцию и помогают перемещаться в различном по консистенции субстрате, что может служить основой их использования в качестве бионического прототипа для проектирования стрелчатых лап культиваторов.

В течение жизни имаго *O. nasicornis* перемещается в достаточно рыхлом слое, который состоит из отмерших тканей различных видов древесных растений, навозе, мусорных кучах и богатых растительной органикой почвах. Твердость такого субстрата минимальна, что позволяет для перемещения жука эффективно использовать передние ноги. При этом основную нагрузку при копании испытывает зубчатая голень. Для этого жук совершает возвратно поступательное движение каждой передней ногой.

Детальное рассмотрение голени жука-носорога позволяет констатировать наличие между зубцами закругленных выемок (рис. 2 а, б). Все пространство между зубцами имеет уплощение к краю строение.

Длина передней выемки (ближе к лапке) варьирует от 1,35 мм до 1,38 мм ($1,37 \pm 0,02$ мм), длина средней выемки – от 1,82 до 1,84 ($1,83 \pm 0,01$ мм). Все измерения производились от центра зубца.

При большем увеличении (200× и 500×) (рис. 3 а, б) отмечается уплощенная структура и самих зубцов, которые характеризуются двухсторонней уплощенностью, что напоминает подобие рабочих органов почвообрабатывающих машин.

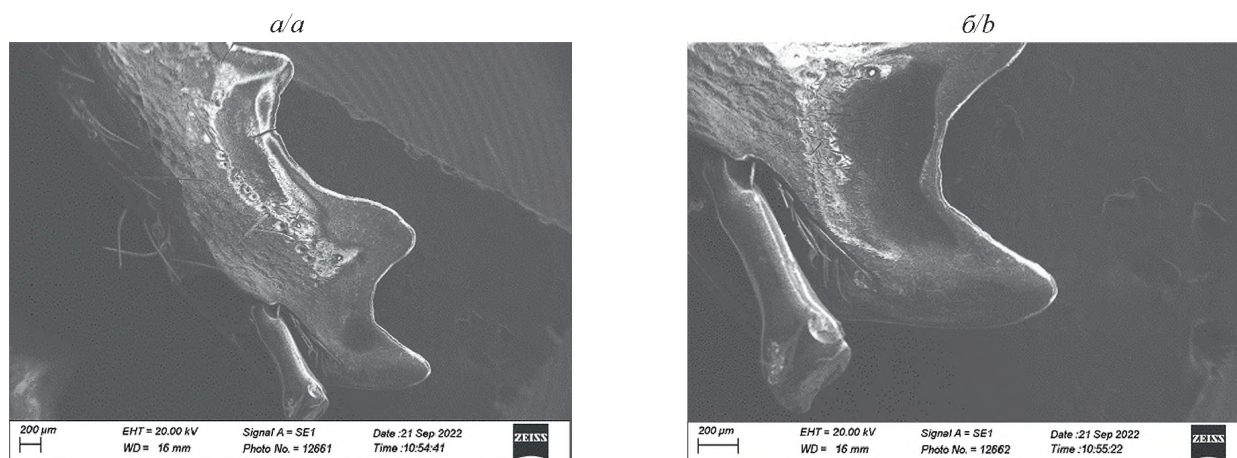


Рис. 2. Голень передней ноги *Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) вид сверху при увеличении: 50× (а), 100× (б)

Fig. 2. Tibia of the front leg of *Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) dorsal view at magnification: 50× (a), 100× (b)

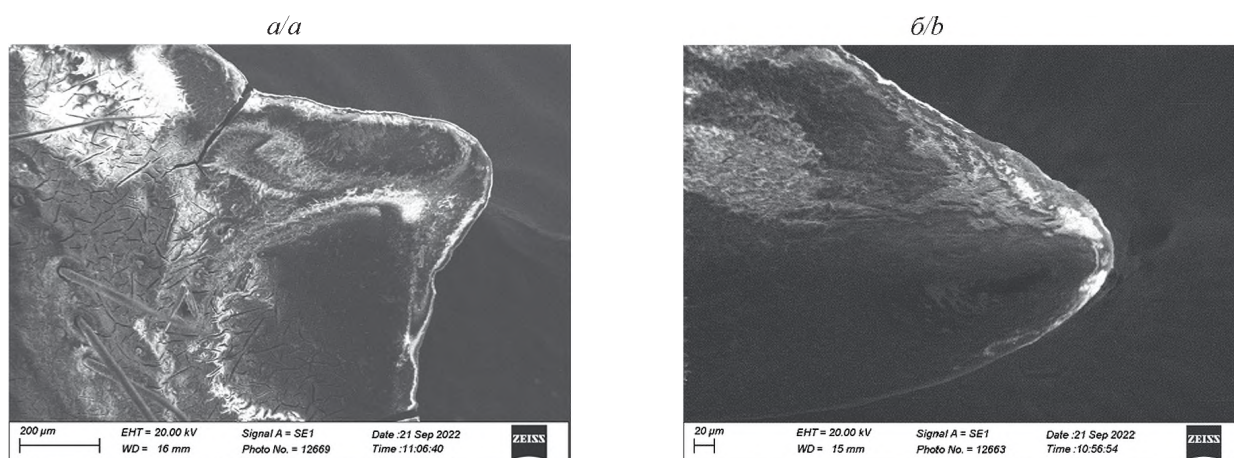


Рис. 3. Отдельный зубец на голени жука-носорога при увеличении: 200× (а); 500× (б)

Fig. 3. An individual tooth on the tibia of a european rhinoceros beetle at magnification: 200× (a); 500× (b)

Высота первого зубчика (ближе к лапке) составляет $0,49 \pm 0,01$ мм, второго – $0,76 \pm 0,02$ мм, третьего – $0,60 \pm 0,01$ мм (измерения от вершины зубчика до основания зубчика – граница выемки).

Скульптура поверхности рабочих органов имеет пористое строение (рис. 4). Отдельные линии формируют извитые каналцы различной глубины. Отмечено наличие Al (алюминия) в тканях зубчиков голени. На гладких участках голени отмечается отсутствие атомов кремния (Si).

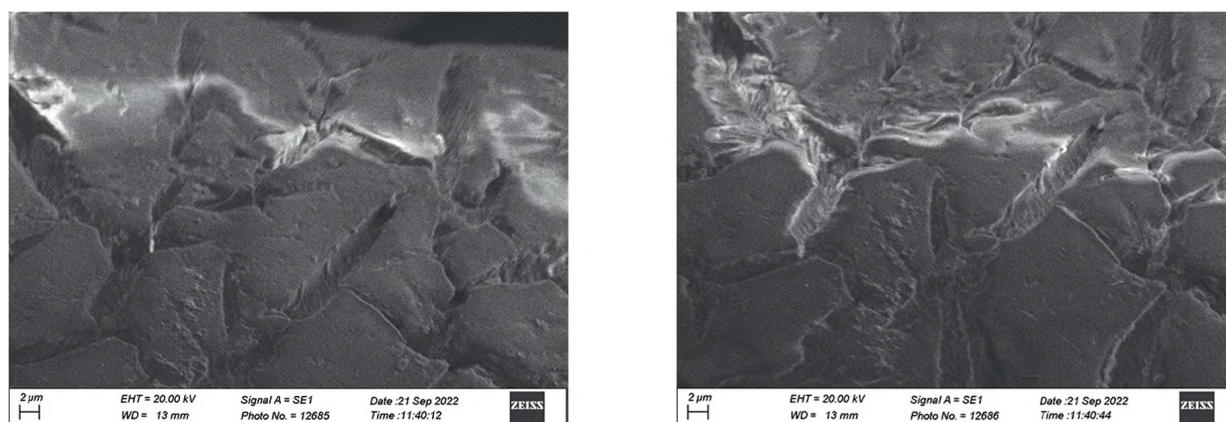


Рис. 4. Скульптура поверхности зубчика голени жука-носорога (увеличение – 5000×)

Fig. 4. Sculpture of the surface of the tibia of a european rhinoceros beetle (magnification – 5000×)

Длина отдельных линий, формирующих исчерченность скульптуры поверхности зубчиков голени, варьирует 1,46–16,28 мкм ($7,65 \pm 1,86$ мкм), ширина – от 0,73 мкм до 1,35 мкм ($1,13 \pm 0,12$ мкм).

Пористость позволяет, по-видимому, легче осуществлять сцепление с субстратом и эффективнее выполнять копательную функцию насекомого.

Применительно к разрыхляющим рабочим органам поисковые исследования позволили установить, что голени обыкновенного жука-носорога совершают эффективное передвижение в почве передними лапами с зубьями шириной b и расположенными с определенным шагом S , одна из которых показана на рис. 5. На основе соотношения размерных характеристик этих частей может быть рассчитана математическая модель потенциальной бионической модели.

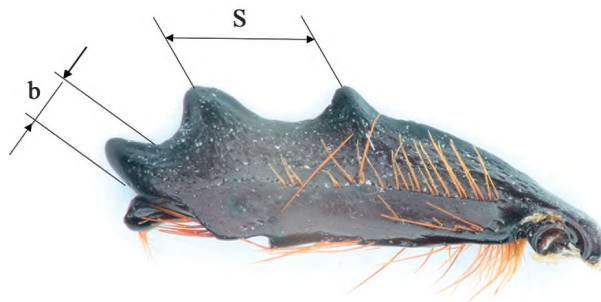


Рис. 5. Голень передней ноги *Oryctes nasicornis* (вид сверху)

Fig. 5. Tibia of the foreleg of *Oryctes nasicornis* (dorsal view)

Особенности морфологии голени других представителей семейства Scarabaeidae может быть проанализирована с целью получения объективной информации для разработки наиболее эффективных технологических решений при проектировании бионических решений в земледельческой механике. Как и в случае голени медведки [35], голень жука-носорога (ее зубчатый край) может быть использована для проектирования рабочей поверхности стрелчатых лап культиваторов. Из полученных данных предполагается использование зубчатого края голени жука-носорога при проектировании стрелчатых лап культиваторов, путем создания накладок из износостойких материалов на рабочую поверхность [36]. При этом общая структура голени может служить полноценным бионическим прототипом для адаптации и создания принципиально новых решений в земледельческой механике, характеризуясь высокой эффективностью и износостойкостью. Это определяется тем, что внутренняя структура голени свидетельствует о соотношении твердого хитинсодержащего слоя с более мягким и пористым, как 1/4–1/8 по линии радиуса, а остальной участок представлен полостью. При создании принципиально новых решений для проектирования сельскохозяйственных орудий стоит учитывать данную полость как важную часть рабочего органа.

Заключение

Развитие бионических исследований рассматривается не только как эффективный инструмент для решения хозяйственно важных задач, но и является частью экоинноваций и регенеративного дизайна. Общая схема бионического проектирования включает в себя не только анализ геометрии, испытывающих основную нагрузку участков функционального органа, но и изучение их элементного состава, общей внутренней и функциональной структуры. Для этих целей проанализированы передние голени жука-носорога. Определено наличие особой геометрии части голени, испытывающей наибольшую нагрузку, рассмотрены особенности микроструктуры поверхности зубцов голени. Основу элементного состава исследуемой части насекомого составляют углерод, кислород и азот. Однако отмечается незначительный процентный состав (менее 0,5 %) алюминия. На гладких участках голени отмечается отсутствие атомов кремния (Si). Данный факт может быть рассмотрен как фактор, касающийся усиления структуры поверхности насекомых, а также качеств, связанных с износостойкостью голени. Внутреннее строение голени показывает, что твердый хитинсодержащий слой соотносится с более мягким и пористым, как 1/4–1/10 по линии радиуса (в различных частях голени), в то время как остальной участок представлен полостью. Как и в случае голени медведки, голень жука-носорога (ее зубчатый край) может быть использована для проектирования рабочей поверхности стрелчатых лап культиваторов. При этом стоит отметить серьезный потенциал использования технологии наплавки и накладок для увеличения долговечности и соответствующих рабочих органов. При создании принципиально новых решений для проектирования сельскохозяйственных орудий стоит учитывать внутреннюю полость как важную часть рабочего органа. Это позволит максимально приблизиться к природному «решению» по сохранению функциональности и износостойкости исследуемых частей у насекомых.

Рассматриваемый подход включает в себя идеи бионики как процесса изучения природных систем и процессов для создания новых материалов, структур и технологий.

Библиографические ссылки

1. Li M, Yang Y, Guo L, Chen D, Sun H, Tong J. Design and analysis of bionic cutting blades using finite element method. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2015;1–7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/471347>.
2. Hayes S, Desha C, Baumeister D. Learning from nature – Biomimicry innovation to support infrastructure sustainability and resilience. *Technological Forecasting and Social Change*. 2020;161:120287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.12>.
3. Blok V. Biomimicry and the materiality of ecological technology and innovation: toward a natural model of nature. *Environmental Philosophy*. 2016;13(2):195–214. DOI: <https://doi.org/10.5840/envirophil201692035>.
4. Forbes P. The Gecko's Foot. Bio-Inspiration—Engineered From Nature. London: Fourth Estate; 2005. 292 p.
5. Myers W. Biodesign: Nature, Science, Creativity. London: Thames & Hudson; 2012. 304 p.
6. Harman J. The Shark's Paintbrush. Ashland: White Cloud Press; 2014. 326 p.
7. Benyus JM. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York: Harper Perennial; 2002. 308 p.
8. Азаренко ВВ, Голдыбан ВВ, Бегун ИП. Методические подходы передачи решений от биологии к инженерии. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2023;56:3–8.
9. Benyus JM. A biomimicry primer. Biomimicry 3.8 Resource Handbook. Missoula: Biomimicry Group Inc.; 2011. 280 p.
10. Li G, Meng H. Overview of crack self-healing. *Recent Advances in Smart Selfhealing Polymers and Composites*. 2015;1–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-280-8.00001-7>.
11. Kumar Ramesh V, Bhuvaneshwari B, Maheswaran S, Palani SG, Ravisankar K, Iyer NR. An overview of techniques based on biomimetics for sustainable development of concrete. *Current Science*. 2011;101(6):741–747.
12. Reap J, Baumeister D, Bras B Holism, biomimicry and sustainable engineering. In: ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition, 2005 November 5–11. Orlando: [publisher unknown]; 2005. p. 423–431. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2005-81343>.
13. Pedersen Zari M, Storey JB. An ecosystem based biomimetic theory for a regenerative built environment. In: International Conference on Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium, 2007 September 12–14. Lisbon: IOS Press; 2007. p. 620–627.
14. Reap JJ. Holistic Biomimicry: A Biologically Inspired Approach to Environmentally Benign Engineering. ProQuest Dissertations Publishing Dissertation/Thesis. Atlanta: Georgia Institute of Technology; 2009. 899 p.
15. De Pauw IC, Karana E, Kandachar P, Poppelaars F. Comparing biomimicry and cradle to cradle with ecodesign: a case study of student design projects. *Journal of Cleaner Production*. 2014;78:174–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.077>.
16. Бабицкий ЛФ, Москалевич БЮ, Соболевский ИВ. Развитие бионического направления в земледельческой механике. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2017;4:69–74.
17. Zhang Z, Wang X, Tong J, Stephen C. Innovative design and performance evaluation of bionic imprinting toothed wheel. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2018. p. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9806287>.
18. Maohua X, Kaixin W, Wang Y, Weichen W, Feng J. Design and Experiment of Bionic Rotary Blade Based on Claw Toe of *Gryllotalpa orientalis* Burmeister. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2021;52(2):55–63.
19. Голдыбан ВВ. Использование бионических принципов при решении отдельных задач земледельческой механики. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2022;55:36–40.
20. Голдыбан ВВ, Синчук ОВ, Ткаченко ГА, Курилович МИ. Исследование мандибул черного садового муравья в качестве бионической модели для повышения надежности культиваторных лап. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2022;55:251–258.
21. Синчук АВ, Логачев МА. Prospects of using the mandibles of the black garden ant (*Lasius niger* (Linnaeus, 1758)) in designing wear-resistant working surfaces of cultivator rake tines. *Young scientist*. 2024;1:261–265.
22. Синчук ОВ, Логачёв МА, Лисовская ЕИ. Перспективы использования личинок обыкновенного муравьиного льва как бионического прототипа для проектирования износостойких рабочих поверхностей стрелчатых лап культиваторов. В: *Проблема оценки, мониторинга и сохранения биоразнообразия. Материалы пятой Республиканской научно-практической экологической конференции, г. Брест, 23 ноября 2023 г.* Брест: БрГУ; 2023. с. 273–276.
23. Медведев СИ. *Пластинчатоусые (Scarabaeidae). Подсем. Euchirinae, Dynastinae, Glaphyrinae, Trichiinae.* Москва; Ленинград: Изд. АН СССР; 1960. 399 с. Серия Фауна СССР. Жесткокрылые.
24. Семёнов-Тян-Шанский АП, Медведев СИ. Жуки-носороги (Oryctes Ill.) русской и среднеазиатской фаун (Coleoptera, Scarabaeidae). *Ежегодник Зоологического музея Академии Наук СССР*. 1931;32(4):481–502.
25. Шилленков ВГ. Редкие жуки (Coleoptera, Scarabidae) Байкальского региона и принципы охраны насекомых. *Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология*. 2010;3(1):37–41.
26. Емцев АА, Берников КА, Акопян ЭК. О расширении границ ареалов некоторых видов животных в северной части Западной Сибири. *Мир науки, культуры, образования*. 2012;6:471–477.
27. Медведев СИ. *Личинки пластинчатоусых жуков.* Москва; Ленинград: Издательство АН СССР; 1952. 342 с.
28. Николаев ГВ. *Пластинчатоусые жуки (Coleoptera, Scarabaeoidea) Казахстана и Средней Азии.* Алма-Ата: Наука; 1987. 232 с.
29. Aleksandrowicz O, Pisanenko A, Ryndevich S, Saluk S. The check-list of Belarus Coleoptera. Slupsk: Pomeranian University; 2023. 189 p.
30. Соболевский ИВ. Бионическое обоснование конструкции ротационного рыхлителя почвы. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2019;20:78–90.
31. Бабицкий ЛФ, Соболевский ИВ, Куклин ВА, Исмаилов ЯН. Теоретические предпосылки к бионическому обоснованию параметров рабочих органов кольчато-режущего почвообрабатывающего катка. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2018;6:121–127.
32. Соболевский ИВ. Исследования качества поверхностной обработки почвы упругими S-образными стойками с регулируемой жесткостью культиватора-плоскореза КПП-3. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2020;21:106–116.

33. Chinary M. Collins guide to the insects of Britain and Western Europe. London: Collins; 1993. 320 p.
34. Просви́ров АС. *Атлас жуков средней полосы России*. Москва: Издательство «Фитон XXI»; 2018. 272 с.
35. Zhang Y, Zhou C, Ren L. Biology Coupling Characteristics of Mole Crickets' Soil-Engaging Components. *Journal of Bionic Engineering*. 2008;5:164–171. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1672-6529\(08\)60089-x](https://doi.org/10.1016/s1672-6529(08)60089-x).
36. Ткаченко ГА, Синчук ОВ, Голдыбан ВВ, Ковальчук АВ. Повышение надежности культиваторных лап за счет упрочнения рабочих поверхностей на основе бионического подхода. В: *Современные технологии для заготовительного производства* [Интернет]. Сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ, 14 апреля 2021 г. Минск: БНТУ; 2021:149–151.

References

1. Li M, Yang Y, Guo L, Chen D, Sun H, Tong J. Design and analysis of bionic cutting blades using finite element method. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2015;1–7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/471347>.
2. Hayes S, Desha C, Baumeister D. Learning from nature – Biomimicry innovation to support infrastructure sustainability and resilience. *Technological Forecasting and Social Change*. 2020;161:120287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.12>.
3. Blok V. Biomimicry and the materiality of ecological technology and innovation: toward a natural model of nature. *Environmental Philosophy*. 2016;13(2):195–214. DOI: <https://doi.org/10.5840/envirophil201692035>.
4. Forbes P. The Gecko's Foot. Bio-inspiration—Engineered From Nature. London: Fourth Estate; 2005. 292 p.
5. Myers W. Biodesign: Nature, Science, Creativity. London: Thames & Hudson; 2012. 304 p.
6. Harman J. The Shark's Paintbrush. Ashland: White Cloud Press; 2014. 326 p.
7. Benyus JM. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York: Harper Perennial; 2002. 308 p.
8. Azarenko VV, Godyban VV, Behun PP. *Metodicheskie podhody peredachi reshenij ot biologii k inzhenerii* [Methodological approaches of decision transfer from biology to engineering]. *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. 2023;56:3–8. Russian.
9. Benyus JM. A biomimicry primer. Biomimicry 3.8 Resource Handbook. Missoula: Biomimicry Group Inc.; 2011. 280 p.
10. Li G, Meng H. Overview of crack self-healing. *Recent Advances in Smart Selfhealing Polymers and Composites*. 2015:1–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-280-8.00001-7>.
11. Kumar Ramesh V, Bhuvaneshwari B, Maheswaran S, Palani SG, Ravisankar K, Iyer NR. An overview of techniques based on biomimetics for sustainable development of concrete. *Current Science*. 2011;101(6):741–747.
12. Reap J, Baumeister D, Bras B Holism, biomimicry and sustainable engineering. *ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition*, 2005 November 5–11. Orlando: [publisher unknown]; 2005. p. 423–431. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2005-81343>.
13. Pedersen Zari M, Storey JB. An ecosystem based biomimetic theory for a regenerative built environment. I: International Conference on Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium, 2007 September 12–14. Lisbon: IOS Press; 2007. p. 620–627.
14. Reap JJ. Holistic Biomimicry: A Biologically Inspired Approach to Environmentally Benign Engineering. ProQuest Dissertations Publishing Dissertation/Thesis. Atlanta: Georgia Institute of Technology; 2009. 899 p.
15. De Pauw IC, Karana E, Kandachar P, Poppelaars F. Comparing biomimicry and cradle to cradle with ecodesign: a case study of student design projects. *Journal of Cleaner Production*. 2014;78:174–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.077>.
16. Babitskiy LF, Moskalevich VY, Sobolevsky IV. *Razvitie bionicheskogo napravlenija v zemledel'cheskoj mehanike* [The development of bionic trends in agricultural mechanics]. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2017;4:69–74. Russian.
17. Zhang Z, Wang X, Tong J, Stephen C. Innovative design and performance evaluation of bionic imprinting toothed wheel. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2018;1–11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9806287>.
18. Maohua X, Kaixin W, Wang Y, Weichen W, Feng J. Design and Experiment of Bionic Rotary Blade Based on Claw Toe of *Gryllotalpa orientalis* Burmeister. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2021;52(2):55–63.
19. Godyban VV. *Ispol'zovanie bionicheskikh principov pri reshenii otdel'nykh zadach zemledel'cheskoj mehaniki* [The use of bionic principles in solving problems of tillage mechanics]. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2022;55:36–40. Russian.
20. Godyban VV, Sinchuk OV, Tkachenko GA, Kurylovich MI. *Issledovanie mandibul chernogo sadovogo murav'ja v kachestve bionicheskoy modeli dlja povyshenija nadezhnosti kul'tivatornykh lap* [Study of black garden ant mandibles as a bionic model to increase the reliability of cultivated paws]. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2022;55:251–258. Russian.
21. Sinchuk AV, Logachev MA. Prospects of using the mandibles of the black garden ant (*Lasius niger* (Linnaeus, 1758)) in designing wear-resistant working surfaces of cultivator rake tines. *Young scientist*. 2024;1:261–265.
22. Sinchuk AV, Logachev MA, Lisovskaya EI. *Perspektivy ispol'zovaniya lichinok obyknovennogo murav'inogo l'va kak bionicheskogo prototipa dlja proektirovaniya iznosostojkih rabochih poverhnostej strel'chatykh lap kul'tivatorov* [Prospects for using common antlion larvae as a bionic prototype for the design of wear-resistant working surfaces of pointed paws of cultivators]. In: *Problema ocenki, monitoringa i sohraneniya bioraznoobrazija*. Materials of the fifth Republican scientific and practical environmental conference, Brest, 2023 November 23. Brest: BrSU; 2023. p. 273–276. Russian.
23. Medvedev SI. *Plastinchatousye (Scarabaeidae). Podsemejstv Euchirinae, Dynastinae, Glaphyrinae, Trichiinae* [Scarab beetles (Scarabaeidae). Subfamilies Euchirinae, Dynastinae, Glaphyrinae, Trichiinae]. Moscow, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1960. 399 p. Series Fauna of the USSR. Coleoptera. Russian.
24. Semenov-Tyan-Shansky AP, Medvedev SI. *Zhuki-nosorogi (Oryctes III.) russkoj i sredneaziatskoj faun (Coleoptera, Scarabaeidae)* [Scarab beetles (Oryctes III.) of Russian and Central Asian faunas (Coleoptera, Scarabaeidae)]. *Yearbook of the Zoological Museum of the USSR Academy of Sciences*. 1931;32(4):481–502. Russian.
25. Shilenkov VG. *Redkie zhuzhelicy (Coleoptera, Carabidae) Bajkal'skogo regiona i principy ohrany nasekomykh* [Rare ground beetles (Coleoptera, Carabidae) of the Baikal region and principles of insect conservation]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Series «Biology. Ecology»*. 2010;3(1):37–41. Russian.
26. Emtsev AA, Bernikov KA, Akopyan EK. *O rasshirenii granic arealov nekotorykh vidov zhivotnykh v severnoj chasti Zapadnoj Sibiri* [On the expansion of the boundaries of the ranges of some animal species in the northern part of Western Siberia]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*. 2012;6:471–477. Russian.

27. Medvedev SI. *Lichinki plastinchatousyh zhukov* [Scarab beetles larvae]. Moscow, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1952. 342 p. Russian.
28. Nikolaev GV. *Plastinchatousye zhuki (Coleoptera, Scarabaeoidea) Kazakhstana i Srednej Azii* [Scarab beetles (Coleoptera, Scarabaeoidea) of Kazakhstan and Central Asia]. Alma-Ata: Nauka; 1987. 232 p. Russian.
29. Aleksandrowicz O, Pisanenko A, Ryndevich S, Saluk S. The check-list of Belarus Coleoptera. Slupsk: Pomeranian University; 2023. 189 p.
30. Sobolevsky IV. *Bionicheskoe obosnovanie konstrukcii rotacionnogo ryhlitelja pochvy* [Bionic rationale for the design of a rotary soil ripper]. *Izvestija sel'skhozjajstvennoj nauki Tavridy*. 2019;20:78–90. Russian.
31. Babitsky LF, Sobolevsky IV, Kuklin VA, Ismailov YaN. *Teoreticheskie predposylki k bionicheskomu obosnovaniju parametrov rabochih organov kol'chato-rezhushhego pochvoobrabatyvajushhego katka* [Theoretical prerequisites for the bionic substantiation of the parameters of the working parts of a ring-cutting soil-cultivating roller]. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2018;6:121–127. Russian.
32. Sobolevsky IV. *Issledovaniya kachestva poverhnostnoj obrabotki pochvy uprugimi S-obraznymi stojkami s reguruej zhestkost'ju kul'tivatora-ploskoreza KPP-3* [Research on the quality of surface tillage of soil using elastic S-shaped stands with adjustable rigidity of the KPP-3 flat cutter cultivator]. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2020;21:106–116. Russian.
33. Chinary M. Collins guide to the insects of Britain and Western Europe. London: Collins; 1993. 320 p.
34. Prosvirov AS. *Atlas zhukov srednej polosy Rossii* [Atlas of beetles of central Russia]. Moscow: Fiton XXI Publishing House; 2018. 272 p. Russian.
35. Zhang Y, Zhou C, Ren L. Biology Coupling Characteristics of Mole Crickets' Soil-Engaging Components. *Journal of Bionic Engineering*. 2008;5:164–171. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1672-6529\(08\)60089-x](https://doi.org/10.1016/s1672-6529(08)60089-x).
36. Tkachenko GA, Sinchuk AV, Goldyban VV, Kovalchuk AV. Increasing the reliability of cultivator shares by strengthening the working surfaces based on the bionic approach. In: *Sovremennye tehnologii dlja zagotovitel'nogo proizvodstva* [Modern technologies for procurement production] [Internet]. Collection of scientific works of the Republican Scientific and Technical Conference of teaching staff, researchers, doctoral students and graduate students of the MTF BNTU (2021 April 14). Minsk: BNTU; 2021:149–151. Russian.

Статья поступила в редколлегию 06.03.2024.
Received by editorial board 06.03.2024.