

УДК 632.935.71

ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ ИМПУЛЬСНОЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ СВЕТОДИОДОВ КАК СПОСОБ УВЕЛИЧИТЬ СБОРЫ СВЕТОЛОВУШКАМИ АКТИВНЫХ НОЧЬЮ НАСЕКОМЫХ НА ПРИМЕРЕ КАПУСТНОЙ МОЛИ *PLUTELLA XYLOSTELLA* (L.) (LEPIDOPTERA, PLUTELLIDAE)

© 2025 г. Ю. А. Захарова,* А. А. Мильцын,** А. Н. Фролов***

Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
шоссе Подбельского, 3, С.-Петербург–Пушкин, 196608 Россия

*e-mail: julia_fefelova@mail.ru, **e-mail: miltsen@yandex.ru,

***e-mail: entomology@vizr.spb.ru (автор, ответственный за переписку)

Поступила в редакцию 15.04.2025 г.

После доработки 22.04.2025 г.

Принята к публикации 22.04.2025 г.

Светоловушки, оснащенные маломощными светодиодными излучателями низкого энергопотребления, благодаря их безопасности для нецелевой энтомофауны весьма перспективны как средство защиты растений от вредных насекомых. Однако в условиях высоких широт уровень естественной освещенности в темное время суток сильно варьирует и аттрактивность маломощных светодиодов в начале лета (т. е. в период белых ночей) становится слишком слабой, чтобы обеспечить достаточную эффективность таких ловушек. В этой статье на примере капустной моли *Plutella xylostella* (L.) показана возможность усиления аттрактивного эффекта маломощных светодиодов за счет замены их питания постоянным током на питание высокочастотным импульсным (30 кГц). Сборы имаго капустной моли с помощью пластиковых ловушек конструкции Дельта, снабженных светодиодными излучателями и синтетическим половым аттрактантом в качестве контроля, проводили в окрестностях С.-Петербурга в 2020–2024 гг. Полученные результаты свидетельствуют, что перевод светодиодов на новый тип питания способствовал существенному росту сборов имаго капустной моли светоловушками — за период белых ночей в 4.57 раза, во время следующих за ними темных ночей — в 3.11 раза, а в целом за лето — в 4.45 раза. Достиженные результаты важны не только в прикладном отношении, но имеют ценность и в теоретическом плане, поскольку воздействие мерцающего света на поведение насекомых изучено совершенно недостаточно.

Ключевые слова: свет, мерцание, фототаксис, сумерки, белые ночи, отлов.

DOI: 10.31857/S0367144525020012, **EDN:** KSMWKK

ВВЕДЕНИЕ

Свет — важнейший экологический фактор для насекомых (Price, 1997), которые в процессе эволюции приобрели крайне эффективные и сложно устроенные органы зрения (Briscoe, Chittka, 2001; Warrant, 2017; van Der Kooi et al., 2021; Warrant, Somanathan, 2022).

Известно, что поведенческая и физиологическая активность большинства видов насекомых контролируется циркадными ритмами, связанными со сменой дня и ночи (Saunders, 2002). Циркадные ритмы у разных видов различны, одни виды активны днем, а другие — ночью и в сумерки (Niepoth et al., 2018; Brady et al., 2021). Сумеречно-ночной образ жизни ведет огромное число видов насекомых, включая большинство чешуекрылых (Lewis, Taylor, 1965; Kristensen et al., 2007; Powell, 2009). При этом исходно сумеречно-ночные виды способны проявлять активность и в дневное время, а вот исходно дневные виды, за редкими исключениями, ночью не летают (Чернышев, 1996).

Свет оказывает воздействие на поведение насекомых самыми разными способами; одна из наиболее типичных реакций на свет — положительный фототаксис (Jander, 1963; Nowinszky, 2003), обычно присущий видам насекомых, активным в темное время суток (Мазохин-Поршняков, 1960; Owens, Lewis, 2018). Эта поведенческая реакция с давних пор используется для привлечения вредных насекомых к источникам искусственного освещения в целях их мониторинга и контроля численности (Herms, Ellsworth, 1934; Williams, 1948; Szentkirályi, 2002; Shimoda, Honda, 2013; Kim et al., 2019; Rhainds, 2024).

Появление светодиодной техники открыло новые возможности в сфере конструирования и применения световых ловушек. Светодиодные излучатели (СДИ) в сравнении с газоразрядными лампами обладают множеством преимуществ: значительно более долгим сроком службы, низким энергопотреблением, более высокой светоотдачей, возможностью выбора цветовой температуры, компактностью, слабым нагревом, устойчивостью к механическим воздействиям, низкими расходами на техническое обслуживание (Bourget, 2008; Bessho, Shimizu, 2012; Bugbee, 2017; Bantis et al., 2018). Кроме того, оказалось, что СДИ способны также обеспечивать большие сборы насекомых в сравнении с иными источниками светового излучения в ловушках — тепловыми и газоразрядными лампами (Cohnstaedt et al., 2008; Brehm, 2017; Infusino et al., 2017; van Deijk et al., 2024). Соответственно, оснащенные СДИ ловушки все шире применяют для борьбы с сельскохозяйственными вредителями путем отлова имаго (Shimoda, Honda, 2013; Park, Lee, 2017; Kim et al., 2019; Фролов, 2022; Ahirwar et al., 2023). Очевидно, что малые размеры и низкое энергопотребление СДИ способствуют удешевлению производства и обслуживания ловушек. Более того, маломощные СДИ с низким энергопотреблением признаны наиболее перспективными источниками света в отношении безопасности для нецелевой энтомофауны, поскольку снабженные ими малоразмерные ловушки легко размещаются в местах обитания вредных видов в агроценозах, а их излучение распространяется на весьма короткие расстояния, активно поглощаясь окружающей растительностью (Niermann, Brehm, 2022).

Капустная моль *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae) — один из наиболее широко распространенных (Европа, Азия, Африка, Америка и Австралия) и вредоносных для растений сем. Brassicaceae (капусты, рапса, турнепса, редиса, редьки, репы, горчицы и других культур) видов насекомых (Furlong et al., 2013; Fathipour, Mirhosseini, 2017; Андреева и др., 2021; Mason, 2022). За последнее десятилетие вредоносность капустной моли очень сильно выросла и в России: значительно расширилась география и многократно возросла частота вспышек массового размножения (Андреева, Шаталова, 2017; Андреева и др., 2019; Шпанев, 2021, 2023). Несмотря на то, что капустная моль способна проявлять летную активность и в дневное время, наиболее активный лёт ее начинается в сумерках и продолжается ночью (Harcourt, 1957; Goodwin, Danthanarayana, 1984; Couty et al., 2006; Nowinszky et al., 2008; Wang et al., 2021). В лабораторных условиях было показано, что двигательная активность имаго сильно зависит от освещения: она резко

и устойчиво подавляется светом и практически сразу активируется темнотой (Tyler et al., 2025). Кроме того, давно установлено, что спаривание и откладка яиц у капустной моли большей частью происходят в первой половине ночи (Pivnick et al., 1990).

Мониторинг с использованием синтетических половых аттрактантов (СПА) — простой, недорогой и достаточно точный способ обнаружения и учета большинства видов насекомых-вредителей, но половые феромоны чешуекрылых привлекают, как правило, лишь самцов, тогда как вредоносное потомство производится самками (Witzgall et al., 2010), и порой оказывается, что плотность бабочек капустной моли, отловленных ловушками с СПА, не коррелирует с плотностью вредящих растениям гусениц (Miluch et al., 2013). В связи с этим световое излучение, способное привлекать не только самцов, но и самок, на протяжении долгого времени остается действенным способом сбора имаго капустной моли (Williams, 1939; Robinson, 1952; Nowinszky, 2003; Shimoda, Honda, 2013).

Мониторинг численности капустной моли в окрестностях С.-Петербурга с помощью ловушек с СДИ слабого свечения обнаружил отрицательную зависимость между плотностями гусениц и куколок на растениях капусты и плотностями имаго, привлеченных на свет, хотя связь плотности гусениц и куколок с численностью имаго, отловленных ловушками с СПА, как и ожидалось, оказалась положительной и высоко достоверной (Захарова и др., 2022). Причиной несоответствия стала сильная изменчивость привлекательности СДИ слабого свечения для имаго капустной моли: в первой половине лета (июнь — начало июля) аттрактивность СДИ существенно уступала таковой СПА, тогда как начиная со второй декады июля соотношение отловов в феромонные и светодиодные ловушки сменилось на противоположное (Захарова и др., 2022).

Известно, что световой поток, излучаемый СДИ, строго пропорционален протекающему через него электрическому току (Schubert, 2006; Winder, 2017). Таким образом, если при стандартном питании постоянным током СДИ светит непрерывно, то при импульсном питании он будет зажигаться и гаснуть в соответствии со скважностью, т.е. коэффициентом заполнения наблюдаемого промежутка времени T активной составляющей питающих импульсов (рис. 1). Поэтому импульсный вариант питания

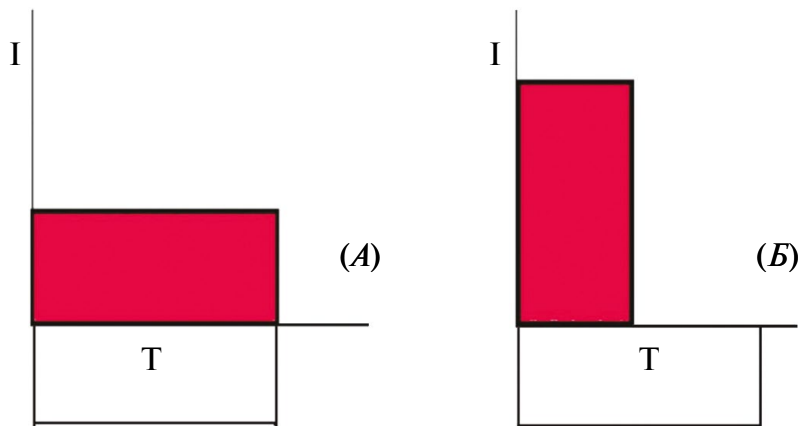


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая распределение затраченной на свечение энергии (закрашенный красным цветом прямоугольник) при питании СДИ за наблюдаемый период времени T током I (А — постоянным, Б — импульсным).

По: Захарова и др., 2023, с изменениями.

при одинаковых затратах энергии за определенный промежуток времени T для обоих вариантов питания позволяет перераспределять использование энергии внутри периода T и в результате появляется возможность свечения СДИ с большей яркостью, чем в случае питания постоянным током, но на меньшее время внутри наблюдаемого промежутка времени T (см. рис. 1) (Захарова и др., 2023).

Поскольку процесс включения и выключения СДИ периодически повторяется, благодаря ожидаемому эффекту инерционности зрения, под которым понимается продленность зрительного ощущения после выключения стимула (Di Lollo, Hogben, 1985, 1987), объект облучения может воспринимать излучение при импульсном питании СДИ как более яркое, чем при питании постоянным током, хотя затраты энергии в обоих случаях одинаковы. Для возникновения указанного эффекта прежде всего необходимо, чтобы частота, с которой мерцает свет, превышала критическую частоту слияния мерцаний, выше которой мерцающий свет будет восприниматься как непрерывный (Umeton et al., 2017; Saint et al., 2019). Хотя критическую частоту мерцания света и инерционность зрения наиболее полно изучали у человека (см., например: Landis, 1954; Davis et al., 2015; Mankowska et al., 2021), давно установлено, что это явление широко распространено во всем животном мире, включая насекомых (Wolf, 1933; Crozier et al., 1937a, b; Agee, 1971; Baker, Cosens, 1983; Inger et al., 2014; Barroso et al., 2017; Lafitte et al., 2022). Целью настоящего исследования стала попытка на примере имаго капустной моли достичь усиления аттрактивного действия СДИ слабого свечения на насекомых путем применения в ловушках высокочастотного импульсного электропитания СДИ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Испытания ловушек проводили в 2020–2024 гг. в окрестностях С.-Петербурга на опытном поле научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (далее ППЛ ВИР) (59°42'51" N, 30°23'47" E) Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова на территории г. Пушкин. Метеорологические условия в летние месяцы 2020–2024 гг. характеризует рис. 2, выполненный по данным, предоставленным метеостанцией ППЛ ВИР. Опытный участок ППЛ ВИР, на котором выращивали коллекционный материал культуры капусты, занимал в указанные годы площадь не менее 1500 м². Здесь рассадным способом (предшественником в разные годы служили посадки овощных культур — кабачка, патиссона, тыквы) выращивали от 148 до 269 образцов мировой коллекции белокочанной, краснокочанной, листовой, брюссельской, цветной капусты и брокколи, представленных зарубежными и отечественными сортами и гибридами. Перед высадкой в поле рассаду обрабатывали инсектицидным препаратом Актара, ВДГ (тиаметоксам, 250 г/кг) против весенней капустной мухи *Delia radicum* (L.) и крестоцветных блошек *Phyllotreta* spp., в грунт вносили навоз и минеральные удобрения. Рассаду капусты высаживали в первой декаде июня, ширина междурядий составляла 70 см, расстояние между растениями в рядах — 60 см, число растений на делянке — 20. В процессе выращивания проводили все рекомендованные для возделывания капусты агротехнические мероприятия: прополки, рыхления, междурядные обработки до смыкания листьев, подкормку аммиачной селитрой.

Для сбора имаго капустной моли использовали ловушки конструкции Дельта, изготовленные в соответствии с документацией, описанной в патенте RU195732 U1 (Мильцын и др., 2020). Корпус ловушек был выполнен из прозрачного водостойкого пластика, в верхней части ловушек помещали съемный электронный блок, содержащий элементы

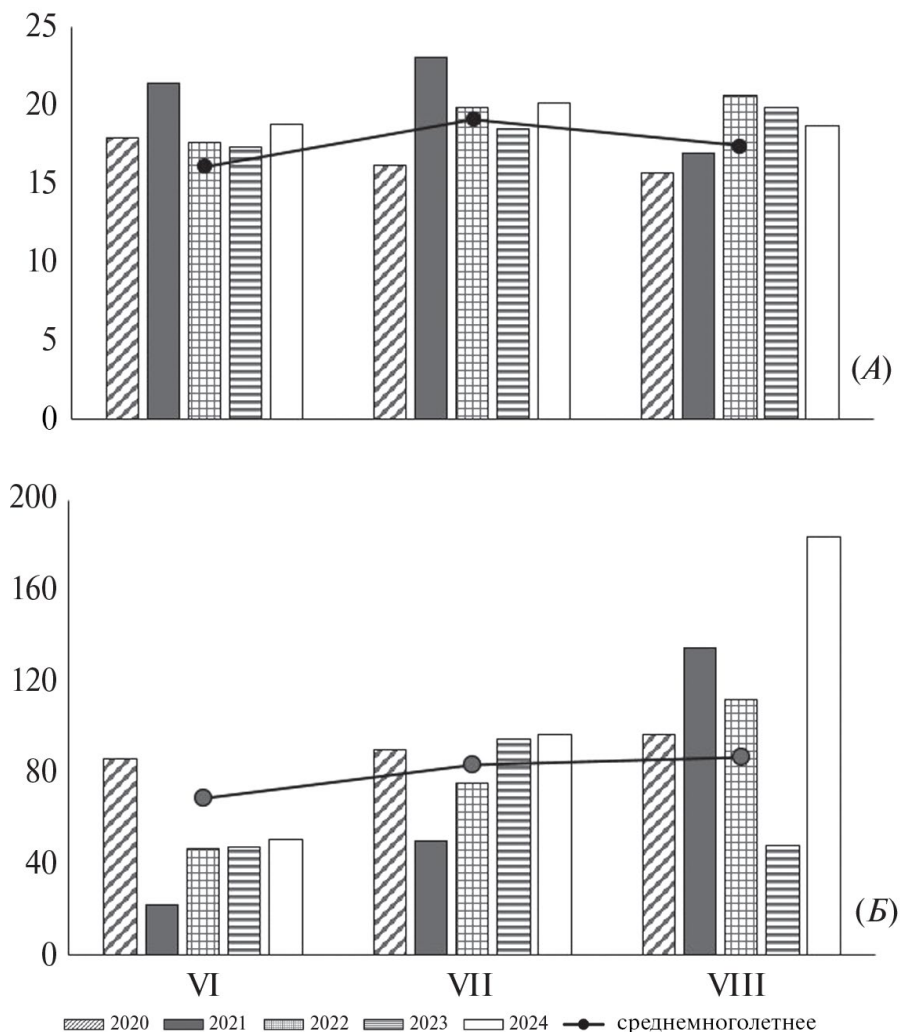


Рис. 2. Метеорологические условия в летние месяцы 2020–2024 гг. на территории научно-производственной базы ППЛ ВИР.

A — среднемесячные температуры воздуха, °C; *B* — суммы осадков за месяц, мм.

питания (6 аккумуляторов AA 1.2 В емкостью 2200 мА/час каждый), фотодатчик, 2 СДИ, закрепленные на одной плате, и блок управления. Внутри последнего был помещен микроконтроллер Attiny 25V с записанной программой управления СДИ и подсоединенными к нему фоторезистором и кнопкой программирования.

Электронный блок легко и просто устанавливался в ловушке, и его можно было при необходимости без труда заменять (Фролов и др., 2024). Поскольку имаго капустной моли наиболее активно привлекает УФ излучение в диапазоне 365–400 нм (Prabaningrum, Moekasan, 2021; Yun et al., 2023; Tarigan et al., 2024), в каждой светоловушке было по 2 СДИ (по умолчанию использовалось питание постоянным током)

производства компании Oumugui (КНР) с длиной волны излучения 365–370 нм, которые излучали свет в противоположных направлениях. Паспортная мощность каждого СДИ составляла 3 Вт, ток СДИ — 40 мА, расчетный световой поток в УФ диапазоне — 25–35 лм. Автоматическое включение СДИ в ловушках настраивали на фактически наблюдавшийся уровень освещенности во время захода солнца, а выключение — на освещенность во время восхода солнца, которые ежегодно фиксировали перед началом проведения испытаний ловушек в начале июня. Электропитанием СДИ управлял микроконтроллер Attiny 25V. Программа, загруженная в микроконтроллер, обеспечивала управление включением и выключением СДИ при заданном (перепрограммируемом) уровне освещенности среды, измерение и информирование пользователя о текущем уровне электрического заряда в аккумуляторах, а также отключение аккумуляторов в случае их глубокого разряда.

При постоянном стабилизированном напряжении ток через СДИ, как правило, задается токоограничивающим резистором в целях обеспечения корректного режима работы (Graf, Sheets, 1996). Однако при питании от автономного источника питания по мере его разрядки ток через СДИ уменьшается и, соответственно, снижается яркость свечения. В этом случае для стабилизации тока через СДИ обычно применяют схему питания с активным регулирующим элементом (Портал радиоэлектроники, 2025). Поскольку и на резисторе, и на регулирующем элементе в виде тепла рассеивается энергия, КПД ловушки с СДИ по энергопотреблению обычно не превышает 60 %. Такую схему электропитания СДИ в ловушках использовали в 2020 и 2021 гг., но в 2022–2024 гг. ее заменили схемой питания высокочастотным импульсным током, описанной в патенте RU220753 U1 (Захарова и др., 2023) (рис. 3). При ней питание СДИ обеспечивалось с помощью генератора прямоугольных импульсов, реализованного на микроконтроллере Attiny 25V. Регулятором тока через СДИ служил дроссель, представляющий собой реактивное сопротивление, благодаря чему нагревания его не происходило. Средний ток СДИ за период составлял 40 мА, КПД использования энергии источника питания такой ловушки достигал 98 %. Программа управления, записанная в микроконтроллер Attiny 25V, в этом случае предусматривала также возможность установки частоты пульсации тока в диапазоне 10–50 кГц. Исходя из соображений минимизации размеров конструкции, возможностей микроконтроллера и времени переходных процессов при включении/выключении СДИ (доли микросекунд) по умолчанию была выбрана частота 30 кГц (период колебаний 33 микросекунды). Поскольку продолжительность переходных процессов при включении/выключении СДИ на два порядка меньше периода колебаний питающего СДИ напряжения, при скважности питающего напряжения равной 0.5 (половину периода напряжение есть, половину периода нет) излучение СДИ будет полностью соотноситься с питающим напряжением.

Считается, что человеческий глаз способен улавливать мерцание света с частотой 50–90 Гц (Mankowska et al., 2021), тогда как зрение насекомых может характеризоваться чуть ли не на порядок большими значениями критической частоты слияния мерцаний (Wolf, 1933; Agee, 1971; Baker, Cosens, 1983; Meyer-Rochow, 2001; Barroso et al., 2017). Установлено, что в экспериментальных условиях порой обнаруживается возможность человеческого глаза различать постоянный и модулированный свет с частотой мерцания на порядок большей, чем обычно (вплоть до 500 Гц) (Davis et al., 2015). Поэтому выбранная для питания СДИ частота пульсации тока, а следовательно и мерцания света, равная 30 кГц, что на 2 порядка превышает максимально зарегистрированное у насекомых значение критической частоты слияния мерцаний, равное 400 Гц для жука *Melanophila*

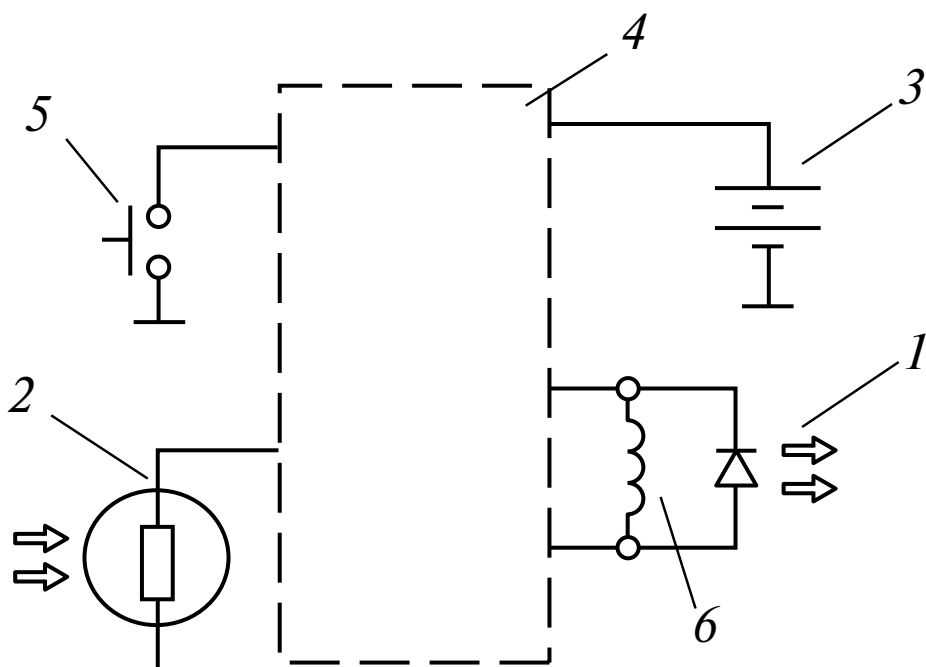


Рис. 3. Электрическая схема электронного блока ловушки с СДИ при импульсном электропитании.

1 — светодиоды, 2 — фоторезистор, 3 — аккумуляторная батарея, 4 — микроконтроллер Attiny 25V, 5 — кнопка программирования освещенности, 6 — дроссель.

По: Захарова и др., 2023, с изменениями.

acuminate (DeGeer) (Inger et al., 2014), должна безусловно обеспечивать условие достижения инерционности зрительного эффекта у имаго капустной моли.

В качестве источника СПА для феромонных ловушек использовали продукт компании ООО «Феромон» (<https://pherotrap.ru/>), а именно резиновые диспенсеры, пропитанные СПА капустной моли (смесь цис-11-гексадеценаля и цис-11-гексадеценил-ацетата в соотношении 10 : 90, к которой в качестве минорного компонента (0.99 % от общего состава) добавлен цис-11-гексадецен-1-ол). Для фиксации привлеченных насекомых на дно каждой ловушки (с СДИ или СПА) помещали покрытую слоем клея картонную пластинку производства этой же компании. Диспенсер с СПА размещали по центру клеевой пластинки.

Варианты приманок в ловушках (СДИ и диспенсеры с СПА) тестировали на протяжении пяти лет (2020–2024 гг.). Ловушки размещали на деревянных кольях высотой 100 см на расстоянии не менее 10 м друг от друга и от края участка, занятого капустой, в виде трех рандомизированных блоков, сразу после высадки рассады капусты в грунт, как правило, в первой декаде июня. До попадания первых особей капустной моли в ловушки их осматривали ежедневно, последующие учеты проводили два раза в неделю. Во время осмотра ловушек имаго капустной моли подсчитывали и удаляли с клеевых пластинок, их пол устанавливали по внешнему строению гениталий (Justus, Mitchell,

1999; Chen et al., 2011). Замену клеевых пластинок проводили по мере их загрязнения, а диспенсеры с СПА меняли 1 раз в месяц.

Статистический анализ проводили с использованием программного продукта Tibco Statistica 14 для оценки значимости ($p \leq 0.05$) различий между данными сборов капустной моли ловушками согласно непараметрическому критерию Вилкоксона (Wilcoxon matched-pairs signed-rank test) (Wilcoxon, 1945). Перед проведением статистического анализа сборы имаго капустной моли в ловушки делили на две части, а именно 1) за период с начала лёта имаго (первая декада июня) до 9 июля и 2) с 10 июля до завершения учетов (первая декада сентября). Хотя официально периодом белых ночей в С.-Петербурге считается промежуток между 11 июня и 2 июля (Galimov, 2020), когда солнце в ночное время опускается за линию горизонта не более чем на 7° (Перельман, 2016), мы, руководствуясь результатами анализа поведенческих реакций капустной моли (Захарова и др., 2022), датировали начало и завершение периода белых ночей в окрестностях С.-Петербурга 3 июня и 9 июля, когда солнце опускалось на 7.7° ниже линии горизонта (Фролов и др., 2024).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты сборов имаго капустной моли снабженными СДИ ловушками в сравнении со сборами в ловушки с СПА в 2020 и 2021 гг. (когда электропитание СДИ в ловушках осуществлялось постоянным током) представлены в табл. 1, а за 2022–2024 гг. (СДИ в эти годы в ловушках были запитаны высокочастотным импульсным током) — в табл. 2.

Подекадную динамику сборов ($\bar{X} \pm SE$) имаго капустной моли на опытном участке за первые два года испытаний (2020 и 2021 гг.) ловушками, снабженными СПА и СДИ (электропитание СДИ в эти годы производилось постоянным током), иллюстрирует рис. 4. Подекадная динамика сборов имаго капустной моли на том же опытном участке

Таблица 1. Сборы имаго капустной моли в ловушках на опытном поле капусты ППЛ ВИР в 2020 и 2021 гг.

Пол бабочек	Приманка	2020 г.			2021 г.			За оба года		
		03.VI – 09.VII	10.VII – 10.IX	03.VI – 10.IX	03.VI – 09.VII	10.VII – 10.IX	03.VI – 10.IX	03.VI – 09.VII	10.VII – 10.IX	03.VI – 10.IX
Самцы	СДИ	381	501	882	195	530	725	576	1031	1607
	СПА	669	168	837	711	98	809	1380	266	1646
Самки	СДИ	8	12	20	10	94	104	18	106	124
	СПА	1	0	1	0	0	0	1	1	2
Оба пола	СДИ	389 a	513 b	902	205 a	624 b	829	594 a	1137 b	1731
	СПА	670 b	168 a	838	711 b	98 a	809	1381 b	267 a	1648
Соотношение сборов бабочек в ловушках с СДИ и СПА		0.58	3.05	1.08	0.29	6.37	1.02	0.43	4.26	1.05

Примечание. Разными буквенными индексами обозначены достоверно различающиеся при $p \leq 0.05$ сборы в течение сезона на разные приманки согласно непараметрическому критерию Вилкоксона.

Таблица 2. Сборы имаго капустной моли в ловушках на опытном поле капусты ППЛ ВИР в 2022–2024 гг.

Пол бабочек	Приманка	2022 г.			2023 г.			2024 г.			Всего за три года		
		03.VI–09.VII	10.VII–10.IX	03.VI–10.IX	03.VI–09.VII	10.VII–10.IX	03.VI–10.IX	03.VI–09.VII	10.VII–10.IX	03.VI–10.IX	03.VI–09.VII	10.VII–10.IX	03.VI–10.IX
Самцы	СДИ	161	803	964	185	613	798	792	977	1769	1138	2393	3531
	СПА	89	24	113	80	29	109	420	133	553	589	186	775
Самки	СДИ	4	23	27	5	3	8	12	46	58	21	72	93
	СПА	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
Оба пола	СДИ	165 b	826 b	991 b	190 b	616 b	806 b	804 b	1023 b	1827 b	1159 b	2465 b	3624 b
	СПА	89 a	24 a	113 a	81 a	29 a	110 a	420 a	133 a	553 a	590 a	186 a	776 a
Соотношение сборов бабочек в ловушках с СДИ и СПА		1.85	34.42	8.77	2.35	21.24	7.33	1.91	7.69	3.30	1.96	13.25	4.67

Примечание. Обозначения как в табл. 1.

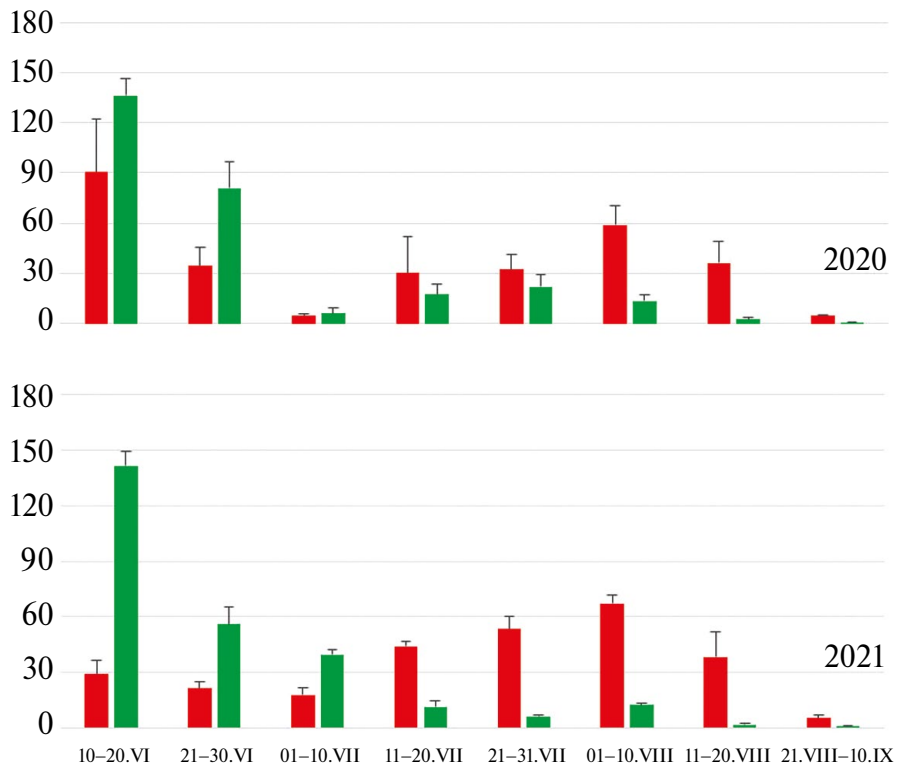


Рис. 4. Подекадная динамика отлова ($\bar{X} \pm SE$) имаго капустной моли ловушками, снабженными СДИ питания постоянным током (красные столбцы) и СПА (зеленые столбцы) на опытном поле капусты ППЛ ВИР в 2020 и 2021 гг.

в последующие три года испытаний (2022–2024 гг.) ловушками, которые были снабжены либо СПА, либо СДИ, электропитание которых осуществлялось высокочастотным импульсным током, представлена на рис. 5.

Представленные в табл. 1 и 2, а также на рис. 4 и 5 данные убедительно свидетельствуют о том, что в период белых ночей, т.е. в первую половину лета (июнь — начало июля) в 2020 и 2021 гг. сборы имаго капустной моли ловушками с СДИ, питаемыми постоянным током, существенно уступали таковым, снабженным СПА. Замена в 2022–2024 гг. питания СДИ в ловушках с постоянного тока на высокочастотный импульсный привела к тому, что сборы имаго светоловушками существенно выросли. Действительно, соотношения сборов имаго капустной моли в ловушки с СДИ и СПА в 2020–2021 гг. в белые и следующие за ними темные ночи оценивались в среднем соответственно, как 0.43 и 4.26, а суммарно — 1.05 (см. табл. 1). В 2022–2024 гг. соотношение отловов в ловушки с СДИ и СПА в белые ночи уже в среднем достигло 1.96, в темные ночи — 13.25, а в сумме за лето — 4.67 (см. табл. 2). Таким образом, сборы имаго капустной моли в ловушки с СДИ в 2022–2024 гг. по сравнению с 2020–2021 гг. выросли за период белых ночей в 4.57 раза, а во время следующих за ними темных ночей — в 3.11 раза. В итоге переход с постоянного питания СДИ на высокочастотное импульсное способствовал росту сборов имаго капустной моли светоловушками за лето в 4.45 раза. Важно отметить, что этот эффект наблюдался в весьма широком диапазоне варьирования метеорологических условий (см. рис. 2).

Далее, судя по данным табл. 1 и 2, определенным преимуществом ловушек, снабженных СДИ, в сравнении с оснащенными СПА, вне зависимости от характера электропитания СДИ, было привлечение на свет помимо самцов также самок, пусть и в небольшом количестве, тогда как совсем мизерную долю самок, попавших в ловушки с СПА, следует, очевидно, считать результатом случайного залета. Доля самок в сборах на СДИ колебалась по годам и сезонам в пределах от 0.5 до 15 %, в среднем составив за 2020–2024 гг. 4.15 % (табл. 3). Доля самок в отловах имаго была максимальной в 2021 г.,

Таблица 3. Процентная доля самок капустной моли в ловушках, снабженных СПА и СДИ (по данным таблиц 1 и 2)

Год	Сроки сбора	Доля самок в ловушках с разной приманкой, %	
		СДИ	СПА
2020	03.VI–09.VII	2.06	0.15
	10.VII–10.IX	2.34	0.00
2021	03.VI–09.VII	4.88	0.00
	10.VII–10.IX	15.06	0.00
2022	03.VI–09.VII	2.42	0.00
	10.VII–10.IX	2.78	0.00
2023	03.VI–09.VII	2.63	1.23
	10.VII–10.IX	0.49	0.00
2024	03.VI–09.VII	1.49	0.00
	10.VII–10.IX	4.50	0.00
Всего в 2020–2024	03.VI–10.IX	4.15 б	0.12 а

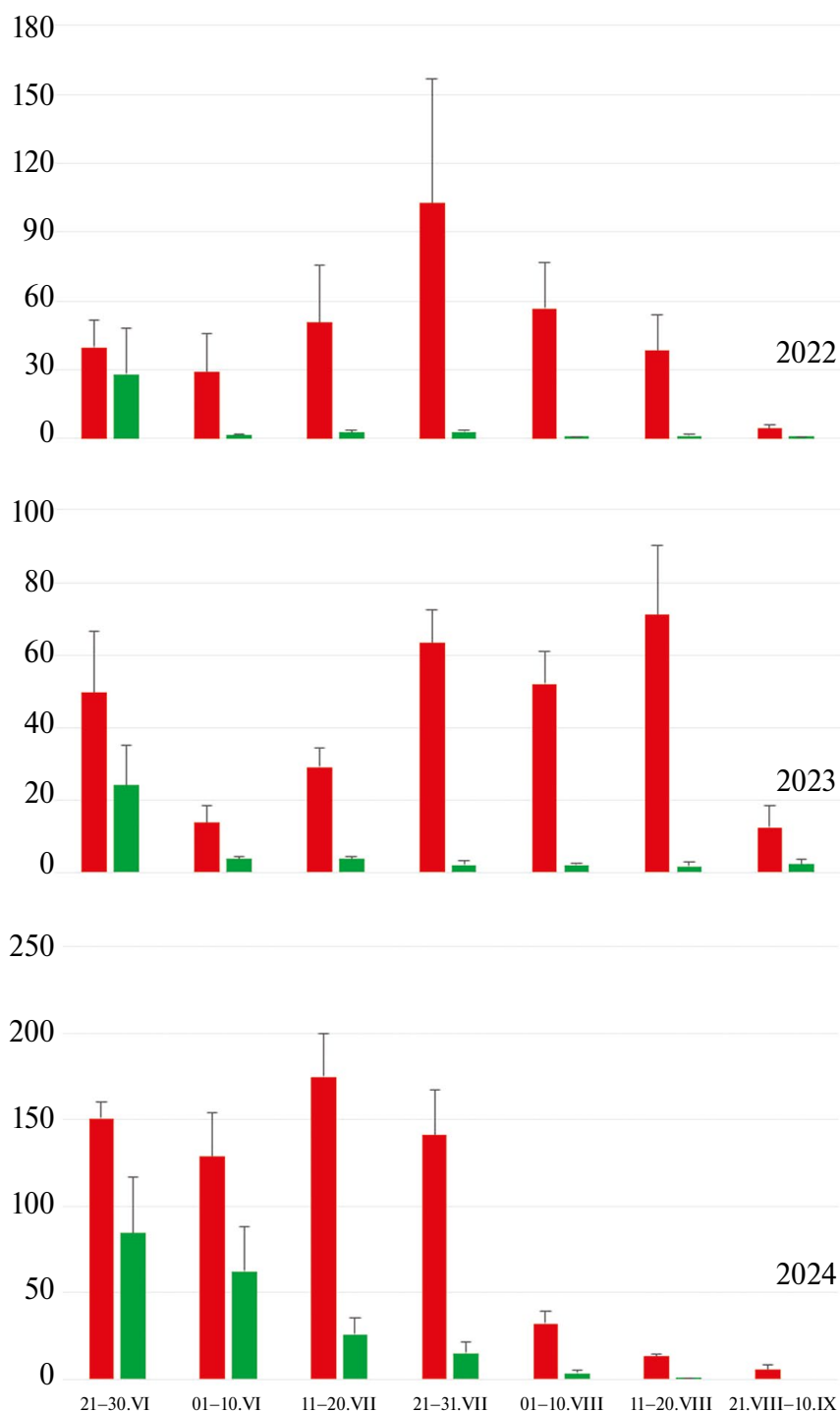


Рис. 5. Подекадная динамика отлова ($\bar{X} \pm SE$) имаго капустной моли ловушками, снабженными СДИ питания высокочастотным импульсным током (красные столбцы) и СПА (зеленые столбцы) на опытном поле капусты ППЛ ВИР в 2022–2024 гг.

который отличался аномальной жарой при минимумах осадков в июне и июле (см. рис. 2). Хотя известно, что скорость полета имаго капустной моли возрастает с температурой воздуха (Shirai, 1991), причины вариации обилия самок в отловах требуют изучения, тем более, что представления об особенностях лёта самок Lepidoptera на свет мало изменились за последнее столетие (Turner, 1918).

Полевые исследования подтвердили сделанный ранее вывод (Захарова и др., 2022) о том, что в сборах насекомых ловушками с СДИ, так же, как и с СПА, преобладала капустная моль — целевой объект мониторинга, особенно в период белых ночей. Однако после завершения этого периода доля нецелевых видов насекомых в ловушках с СДИ стала превышать их долю в ловушках с СПА. Среди нецелевых объектов в сборах на свет доминировали представители отрядов Diptera и Lepidoptera, реже — Hemiptera (Heteroptera и Homoptera) и Coleoptera. Большинство собранных нецелевых видов насекомых составляли вредители капустных (например, капустные мухи *Delia* spp.) и других овощных культур, а полезные насекомые, включая энтомофагов и иных представителей отряда Hymenoptera, в ловушки с маломощными СДИ почти не попадались (рис. 6, 7).

ОБСУЖДЕНИЕ

Разнообразные по конструкции ловушки для насекомых находят все более широкое применение в мировой практике защиты растений, причем не только для мониторинга, но и как средство борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур. Это в полной мере отвечает приоритетности принципа использования наиболее безопасных для окружающей среды способов подавления вредных организмов (Dent, Binks, 2020). Как правило, ловушки снабжаются средствами или устройствами, обеспечивающими управление поведением насекомых путем воздействия на их сенсорные системы (Foster, Harris, 1997; Mazzoni, Anfora, 2021), среди которых обычно выделяют аттрактанты химической (семиохемии) и физической (семиофизики) природы (Gross, Franco, 2022; Nieri et al., 2022). В первом случае речь идет прежде всего о феромонах, а также об алломонах, кайромонах и синомонах (Agelopoulos et al., 1999), а во втором чаще всего упоминаются световые излучения (Фролов и др., 2021). В практическом отношении как семиохемии, так и семиофизики имеют как преимущества, так и недостатки, причем одни и те же свойства могут рассматриваться в качестве тех или других в зависимости от целей и условий применения (Фролов, 2022). Так, в сравнении с семиохемиками свет в ловушках в целом характеризуется гораздо более слабой видовой избирательностью по аттрактивности, что в зависимости от целей сбора насекомых может рассматриваться либо как достоинство (широкий охват привлекаемых объектов для фаунистического анализа и выявления адвентивных видов) (Kammar et al., 2020), либо как недостаток (уничтожение нецелевых энтомологических объектов как побочный эффект при подавлении численности вредных видов) (Фролов, 2022). Далее, хотя ловушки, снабженные маломощными СДИ низкого энергопотребления, и будут проигрывать более мощным источникам света в отношении аттрактивности для насекомых, так как привлекают их лишь на коротких расстояниях (Труха, Fiedler, 2012), но именно они способны обеспечить более высокий уровень безопасности для нецелевой энтомофауны (Niermann, Brehm, 2022). Представленные в данной статье результаты в целом подтверждают такую точку зрения, хотя доля нецелевых видов насекомых в отловах ловушками с СДИ была в целом выше, чем в ловушках с СПА. Этот результат отличается от данных других исследований.



Рис. 6. Картонные пластинки с клеем, извлеченные из установленных на опытном поле капусты ППЛ ВИР ловушек, снабженных СДИ (А, В), питаемыми постоянным током, и СПА (Б, Г).

А, В — сборы в июне и первой декаде июля; В, Г — то же во второй декаде июля — августе.

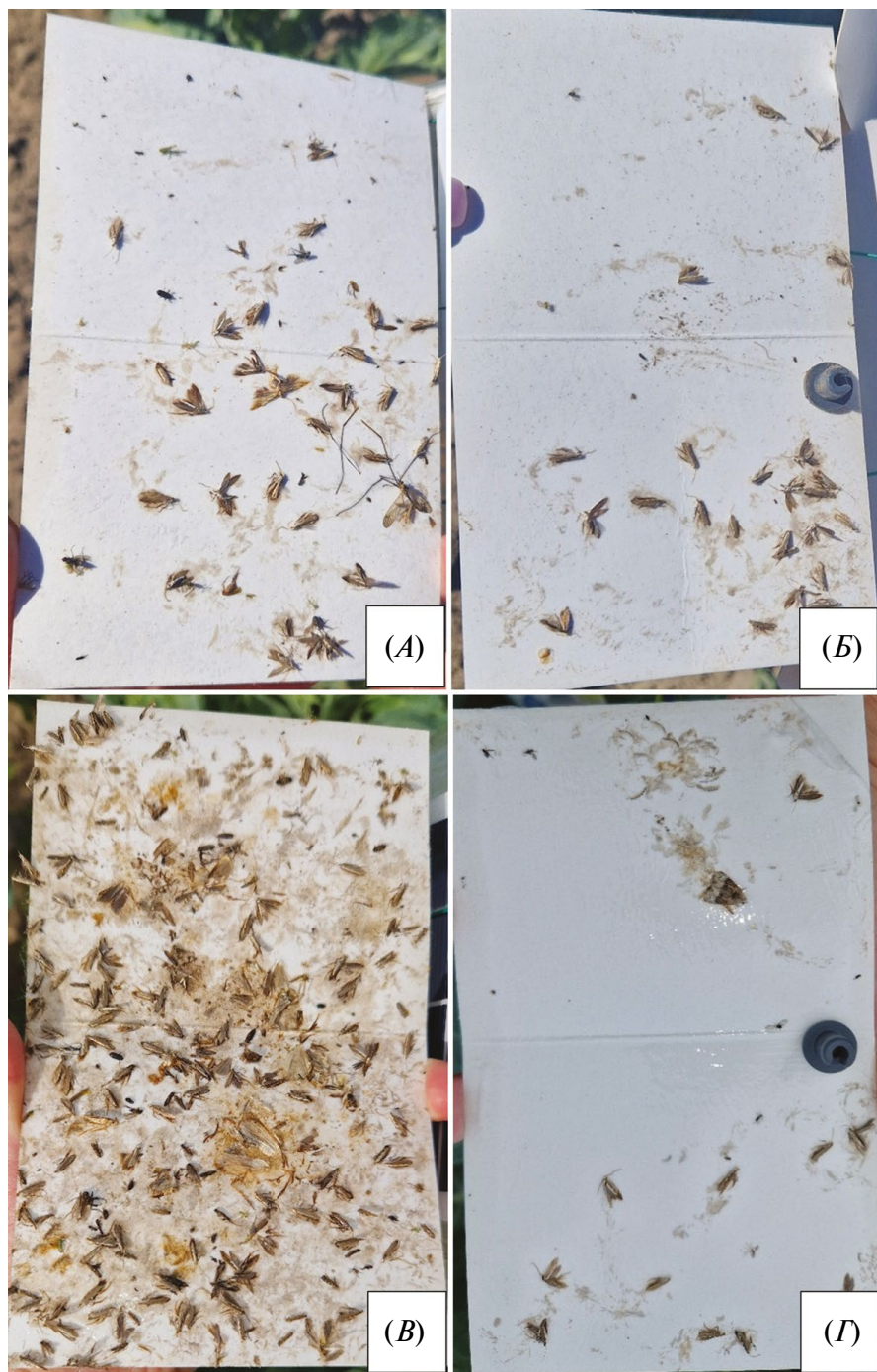


Рис. 7. Картонные пластинки с клеем, извлеченные из установленных на опытном поле капусты ППЛ ВИР ловушек, снабженных СДИ (А, В), питаемыми высокочастотным импульсным током, и СПА (Б, Г).

А, Б — сборы в июне и первой декаде июля; В, Г — то же во второй декаде июля — августе.

Так, при мониторинге кукурузного мотылька *Ostrinia nubilalis* (Hbn.) на кукурузе (Грушевая и др., 2019) и яблонной плодовой *Cydia pomonella* (L.) в садах (Фролов и др., 2024) доля нецелевых видов в уловах ловушками с СДИ и СПА была практически одинаковой. Вероятно, это отличие связано с тем, что ловушки на поле кукурузы и в саду были окружены густой листвой, поглощавшей УФ излучение, тогда как в нашем эксперименте ловушки располагались над посадками капусты, что позволяло свету беспрепятственно распространяться на гораздо большие расстояния. При этом негативный эффект от вылова полезных видов насекомых ловушками с маломощными СДИ в наших опытах все равно оказывался минимальным.

Снабженные СПА ловушки для мониторинга капустной моли нашли в мире самое широкое применение, которому посвящена обширная литература (Baker et al., 1982; Hallett et al., 1995; Shirai, Nakamura, 1995; Kuwahara et al., 1996; Reddy, Urs, 1996; Reddy, Guerrero, 2000, 2001; He et al., 2003; Walker et al., 2003; Wang et al., 2004; Sulifoa, Ebenebe, 2007; Evenden, Gries, 2010; Nofemela, 2010; Miluch et al., 2013, 2014; Wainwright et al., 2020; Zahoor et al., 2023). В России СПА капустной моли также успешно прошли полевые испытания (Семеренко, Бушнева, 2018; Бобрешова и др., 2020; Черятьева, Ходаков, 2022). Помимо мониторинга, ловушки, привлекающие имаго капустной моли с помощью СПА, неоднократно предлагалось использовать в качестве средства борьбы с этим вредителем, в том числе для массового вылова имаго, обеспечивающего создание самцового вакуума (Reddy, Urs, 1997; Wang et al., 2004; Topagi et al., 2018; Syed et al., 2019; Gonzalez et al., 2023) или распространение энтомопатогенных микроорганизмов методом автодиссеминации (Pell et al., 1993; Furlong et al., 1995; Vickers et al., 2004). Вылов имаго вредителя ловушками, снабженными СПА, можно увеличить добавлением в приманку семиохемиков растительного происхождения (Li et al., 2012; Chi et al., 2024).

Хотя оснащенные СДИ ловушки также предлагалось применять в качестве средства мониторинга и/или подавления численности капустной моли путем массового отлова имаго, работ, посвященных реализации этих приемов, опубликовано совсем немного (Prabaningrum, Moekasan, 2021; Mason, 2022; Tarigan et al., 2024). Кроме того, лишь в единичных статьях сопоставляется аттрактивность для имаго капустной моли ловушек, оснащенных СДИ и СПА (Suresh et al., 1989; Захарова и др., 2022; Tarigan et al., 2024).

Очевидно, что к серьезным преимуществам ловушек, снабженных СПА, перед ловушками с СДИ, относятся их относительные дешевизна конструкции и простота применения. И если эти преимущества могут стать решающими при выборе ловушек для мониторинга, то при выборе ловушек для подавления численности вредителя предпочтение будет определяться уловистостью. Наши материалы свидетельствуют о том, что ловушки, снабженные СДИ, способны отлавливать в несколько раз больше особей имаго вредителя, чем ловушки с СПА, однако такой результат далеко не всегда достигается автоматически, поэтому важно обсудить факторы и условия, определяющие изменчивость аттрактантных свойств светоловушек. Опытным путем давно установлено, что привлекающее действие света для обладающих положительным фототаксисом насекомых в первую очередь обнаруживает сильную отрицательную связь с уровнем естественной освещенности (Mikkola, 1972; Bowden, 1982, 1984; Leinonen et al., 1998), в связи с чем вариация объемов сбора насекомых световыми ловушками обычно выше, чем у феромонных (Фролов и др., 2024).

Благодаря вращению Земли вокруг своей оси создается впечатление движения солнца по небу, и по давней традиции в астрономии принято описывать это явление как перемещение светила по воображаемой небесной сфере, в центре которой находится наблюдатель (Воронцов-Вельяминов, 1980). Касательную к поверхности Земли плоскость, проходящую через точку наблюдения, именуют плоскостью горизонта, а угол между плоскостью горизонта и направлением на солнце рассматривают в качестве высоты светила над горизонтом, которая может меняться от -90 до $+90^\circ$ (отрицательные значения высоты светила соответствуют его положению ниже уровня горизонта) (Kondratyev, 1969; Тимофеев, Васильев, 2003). Соответственно, в середине дня на открытом месте и в ясную погоду освещенность в природе достигает 129×10^3 лк, а ночью она падает до менее чем 6×10^{-4} лк. Облачность может снизить дневную освещенность до нескольких сотен или тысяч люкс, но вечером в пасмурную погоду низкие значения освещенности наблюдаются лишь ненадолго раньше, чем в ясную. Лунный свет создает освещенность до 0.32 лк (Hänel et al., 2018). Таким образом, дважды в сутки освещенность земной поверхности изменяется очень сильно, но благодаря рассеянию света в атмосфере этот переход совершается не мгновенно, а растягивается на более или менее длительный период, именуемый сумерками, которые порождают образы и пейзажи, издавна вдохновляющие писателей и художников, не дающие покоя романтикам и интригующие философов и ученых (Davidson, 2015). Различают вечерние (сразу после захода солнца) и утренние (перед восходом солнца) сумерки, а по уровню освещенности, т. е. по глубине погружения солнца за линию горизонта — гражданские, навигационные и астрономические. В качестве нижних границ гражданских сумерек обычно принимают угол погружения центра солнца ниже линии горизонта до 6° , навигационных — до 12° , а астрономических — до 18° (Ahrens, Henson, 2019). Хотя природная освещенность в сумерки варьирует в зависимости от самых разных факторов (Розенберг, 1963; Roach, Gorden, 1973; Leinert et al., 1998), уровни освещенности при безоблачном небе оцениваются в среднем как 3.4 лк при завершении гражданских сумерек и 8.1×10^{-3} лк в конце навигационных сумерек (Hänel et al., 2018).

Расчеты свидетельствуют, что в среднем около четверти своего времени население планеты живет в условиях сумерек, продолжительность которых зависит от широты местности и времени года и может меняться в очень широких пределах, особенно в летний период. Так, в тропиках, где солнце круче всего опускается к горизонту, продолжительность сумерек составляет около 10–15 %, а в условиях высоких широт — 30–40 % длительности года, причем летом утренние и вечерние сумерки там могут сливаться, образуя так называемые белые ночи, период которых может составлять несколько недель (Розенберг, 1963). Хотя астрономически точного определения понятия белой ночи не существует (Розенберг, 1963), обычно считают, что данный феномен наблюдается в Северном полушарии к северу от 59.5° с.ш., когда солнце опускается под горизонт не более чем на 7° (Перельман, 2016). Явление белых ночей, отраженное в творчестве многих писателей и поэтов С.-Петербурга и привлекающее в этот город туристов со всего мира (Lincoln, 2009), официально отмечают ежегодно с 11 июня по 2 июля (Galimov, 2020). При этом совершенно очевидно, что границы фаз вечерних сумерек выделены на основе восприятия окружающего мира людьми: во время гражданских сумерек освещенность сохраняется на весьма высоком уровне, так что в это время даже для чтения не требуется подключать дополнительное освещение, которое уже необходимо в фазу навигационных сумерек, когда на небе видно немало звезд, позволяющих безошибочно определять местоположение наблюдателя. Далее, при наступлении астрономических сумерек, условия освещения уже практически не отличаются от ночных и на не-

босклоне видны все звезды, только чуть более светлое небо препятствует проведению астрономических наблюдений (Розенберг, 1963). Поскольку насекомые воспринимают окружающую действительность иначе, чем люди (Глунов, 2013), в качестве дат начала и завершения периода белых ночей в окрестностях С.-Петербурга, основываясь на анализе поведенческих реакций имаго капустной моли (Захарова и др., 2022), мы использовали соответственно 3 июня и 9 июля, когда солнце опускается под линию горизонта на глубину до 7.7° (Фролов и др., 2024). Актуальность обсуждаемых вопросов очевидна, ведь севернее широты С.-Петербурга лежит более половины территории России (Гладкий, 2011), где, как и на землях соседней Северной Европы, капустная моль может наносить весьма серьезный вред капустным культурам (Kanervo, 1936; Coulson et al., 2002; Овсянникова и др., 2008; Макарова и др., 2012).

Как известно, способность глаза у человека распознавать мерцания света зависит от множества факторов, в том числе от частоты и амплитуды модуляции, средней интенсивности освещения, длины волны или цвета светодиода, освещенности в окружающей среде, расстояния от источника мерцающего света и его размеров, а также от состояния организма (Landis, 1954; Brundrett, 1974; Mankowska et al., 2021). Благодаря совершенствованию осветительной техники интерес к психофизике зрения в связи с мерцанием света возник довольно давно. Так, еще в XIX в. был сформулирован экспериментальный закон Тальбота—Плато, гласящий, что воспринимаемая яркость мерцающего света определяется относительными периодами света и темноты (Wikipedia, 2024). По сути, положения этого закона стали психофизическим обоснованием применения технологии широтно-импульсной модуляции (сокращенно ШИМ), которая используется для регулировки яркости свечения дисплеев, в основном относящихся к классу OLED (AMOLED и др.). Эта технология основана на подаче контроллером импульсного напряжения на пиксели экрана, что приводит к мерцанию света, которое хотя и превышает присущую людям критическую частоту слияния мерцаний, способно у некоторой части населения вызывать зрительный дискомфорт, головные боли и даже тошноту (Kim, 2021; Wu et al., 2023; Kurgansky, 2024). Важно отметить, что если в рядовых аппаратах обычно применяется частота пульсации напряжения в пределах 200–250 Гц, то наиболее совершенные устройства используют гораздо большие частоты — вплоть до 4320 Гц, что обеспечивает людям, чувствительным к мерцанию ШИМ, возможность комфортно пользоваться смартфонами с такими экранами (Форум 4PDA, 2025).

Влияние на насекомых мерцающего света обычно обсуждается в литературе (Inger et al., 2014; Lafitte et al., 2022, 2023) в связи с острой проблемой антропогенного светового загрязнения (Jägerbrand, 2018; Owens et al., 2020; van Grunsven et al., 2020; Boyes et al., 2021; Жуковская и др., 2022; De Causmaecker et al., 2022, 2023; Lafitte et al., 2022, 2023; Longcore, 2023; Linares Arroyo et al., 2024), которое считают одной из важнейших причин сокращения численности насекомых на планете (Forister et al., 2019; Wagner et al., 2021; Blüthgen et al., 2023, и др.). При этом авторы обзорных работ о воздействии мерцания света на насекомых приходят к совершенно справедливому выводу о том, что вопрос изучен совершенно недостаточно, и лишь в 2-х статьях приведены данные, характеризующие лёт насекомых на свет (Lafitte et al., 2022, 2023). В одной статье сообщается об уменьшении сборов ночных насекомых (в первую очередь представителей отрядов Diptera, Hemiptera и Lepidoptera) в ловушки, излучающие мерцающий свет с частотами 120 или 240 Гц, по сравнению с теми, которые излучали немерцающий свет, причем каких-либо признаков положительного изменения в фототаксисе от мерцания света обнаружить не удалось (Barroso et al., 2017). В другой статье указывается, что благодаря применению

технологии ШИМ удалось одновременно достичь экономии электроэнергии и роста аттрактивности световых сигналов СДИ с частотой 64 Гц для двукрылых насекомых, включая комаров *Aedes aegypti* (L.) и *A. albopictus* (Skuse) (Liu et al., 2017). В связи с этим стоит также упомянуть приведенные в патенте RU220753 U1 данные, которые свидетельствуют о росте в 1.5 раза сборов бабочек сливовой плодовой гнили *Grapholita funebrana* Tr. ловушками с питаемыми высокочастотным импульсным током СДИ по сравнению с ловушками, в которых СДИ питались постоянным током. Эти данные были получены в окр. С.-Петербурга в период с начала июня по 17 июля 2023 г., т. е. в основном во время белых ночей (Захарова и др., 2023). Представленные в настоящей статье данные свидетельствуют о том, что при замене в ловушках с СДИ слабого свечения электропитания постоянным током на импульсный с частотой 30 кГц сборы имаго капустной моли вне зависимости от метеорологических условий года выросли за период белых ночей в среднем в 4.57 раза, во время следующих за ними темных ночей — в 3.11 раза, и в общей сложности — в 4.45 раза. Столь высокая частота импульсного питания была выбрана, исходя из 1) соображений минимизации размеров конструкции, возможностей микроконтроллера и времени переходных процессов при включении/выключении СДИ (доли микросекунд) и 2) сведений литературы, хотя и не очень многочисленных, о характере воздействия мерцающего света на поведение и физиологию животных. Так, к настоящему времени, в том числе путем снятия электроретинограмм и применения поведенческих методов анализа (например, Railton et al., 2009; Lisney et al., 2011, 2012), удалось установить, что летающим животным — насекомым и птицам, ориентация которых в пространстве требует принятия быстрых решений, в целом свойствен весьма высокий порог частоты слияния мерцаний (Inger et al., 2014; Boström et al., 2016; Barroso et al., 2017; Donner, 2021), существенно превышающий обычные показатели человеческого глаза (Mankowska et al., 2021). Поэтому, учитывая выдающиеся способности зрения у ночных насекомых (Warrant, 2017), для безусловного достижения у них инерционности зрительного эффекта была выбрана частота пульсации питающего СДИ тока, заведомо (на 2 порядка) превосходящая максимально зарегистрированное значение критической частоты слияния мерцаний, равное 400 Гц (Inger et al., 2014).

Таким образом, документированное в настоящей статье существенное увеличение объема сборов капустной моли в ловушки с СДИ высокочастотного импульсного питания явно не случайно и объясняется проявлением психофизических эффектов слияния мерцаний и инерционности зрения, благодаря которым свечение СДИ при высокочастотном импульсном питании выглядит более ярким, чем свечение СДИ, питаемых постоянным током, хотя затраты энергии в обоих случаях совершенно одинаковы. Иными словами, представленные в статье материалы хорошо согласуются с современными представлениями о глубоком функциональном сходстве зрительных систем позвоночных и насекомых (Sanes, Zipursky, 2010; Clark, Demb, 2016).

Полученные нами результаты и их сопоставление с литературными данными полезны прежде всего в качестве свидетельства перспективности использования светоловушек с СДИ, питаемых высокочастотным импульсным током. При этом важно подчеркнуть, что характер изменения реакции фототаксиса у сумеречно-ночных видов насекомых в сторону ее либо усиления, либо ослабления будет, очевидно, в первую очередь зависеть от частоты мерцания света. Соответственно, если в ответ на высокочастотное мерцание мы видим усиление положительной реакции фототаксиса у ночных насекомых, то при мерцании света с низкой частотой (100 или 120 Гц), возникающей в результате питания электросетей переменным током с частотой 50 Гц в Европе или 60 Гц в США, реакция

фототаксиса у тех или иных видов насекомых, по всей вероятности, уже окажется негативной (Inger et al., 2014). Иными словами, представленные в статье результаты не только полезны для решения задач прикладного характера, но и вносят вклад в развитие представлений о психофизике зрения насекомых, поскольку временные аспекты обработки зрительной информации у них до сих пор изучены крайне слабо (Donner, 2021).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарны А. М. Артемьевой (ВИР) за возможность проведения полевых работ и Е. Е. Радченко (ВИР) за предоставление метеоданных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева И. В., Ашмарина Л. Ф., Шаталова Е. И. 2019. Особенности изменения фитосанитарного состояния кормовых культур в условиях Западной Сибири. Достижения науки и техники АПК **33** (10): 26–30.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11006>
- Андреева И. В., Шаталова Е. И. 2017. Сезонное развитие капустной моли и ее энтомофагов в Западной Сибири. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки **47** (3): 42–48.
- Андреева И. В., Шаталова Е. И., Ходакова А. В. 2021. Капустная моль *Plutella xylostella*: эколого-биологические аспекты, вредоносность, контроль численности. Вестник защиты растений **104** (1): 28–39.
<https://doi.org/10.31993/2308-6459-2021-104-1-14947>
- Бобрешова И. Ю., Рябчинская Т. А., Стулов С. В., Пятнова Ю. Б., Каракотов С. Д. 2020. Метод феромониторинга капустной моли (*Plutella xylostella* L.) — опасного вредителя рапса. Агрохимия **7**: 68–75.
<https://doi.org/10.31857/S0002188120050038>
- Воронцов-Вельяминов Б. А. 1980. Очерки о Вселенной, 8-е издание, переработанное. М.: Наука, 672 с.
- Гладкий Ю. Н. 2011. Россия: «антилиберальная» природа против либеральной экономики. Общество. Среда. Развитие **2** (19): 201–207.
- Глулов В. В. 2013. С точки зрения насекомого. Наука из первых рук **2** (50): 96–109.
- Грушевая И. В., Конончук А. Г., Малыш С. М., Мильцын А. А., Фролов А. Н. 2019. Светодиодная ловушка для мониторинга кукурузного мотылька *Ostrinia nubilalis*: результаты испытания в Краснодарском крае. Вестник защиты растений **102** (4): 49–54.
<https://doi.org/10.31993/2308-6459-2019-4-102-49-54>
- Жуковская М. И., Северина И. Ю., Новикова Е. С. 2022. Световое антропогенное загрязнение: действие на насекомых. Биосфера **14** (2): 126–136.
<https://doi.org/10.24855/biosfera.v14i2.669>
- Захарова Ю. А., Мильцын А. А., Фролов А. Н. 2023. Светодиодная ловушка для отлова насекомых с импульсным электропитанием. Патент на полезную модель RU220753 U1, 02.10.2023. Заявка № 2023119972 от 28.07.2023.
- Захарова Ю. А., Фролов А. Н., Артемьева А. М. 2022. Мониторинг капустной моли (*Plutella xylostella* L.) на коллекции капусты в окрестностях Санкт-Петербурга. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции **183** (4): 219–228.
<https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-4-219-228>
- Мазохин-Поршняков Г. А. 1960. Почему насекомые летят на свет. Энтомологическое обозрение **39** (1): 52–58.
- Макарова О. Л., Свиридов А. В., Клепиков М. А. 2012. Чешуекрылые (Lepidoptera) полярных пустынь. Зоологический журнал **91** (9): 1043–1057.
- Мильцын А. А., Грушевая И. В., Конончук И. В., Малыш Ю. М., Токарев Ю. С., Фролов А. Н. 2020. Световая ловушка для мониторинга насекомых. Патент на полезную модель RU195732 U1, 04.02.2020. Заявка № 2019131861 от 09.10.2019.
- Овсянникова Е. И., Гричанов И. Я., Саулич М. И. 2008. Ареал и зоны вредоносности капустной моли (*Plutella xylostella* L.). В сб.: А. Н. Афонин, С. Л. Грин, Н. И. Дзюбенко, А. Н. Фролов (ред.). Агро-экологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения [Интернет-версия 2.0]. [URL: https://agroatlas.ru/ru/content/pests/Plutella_maculipennis/map/index.html]
- Перельман Я. И. 2016. Занимательная астрономия. СПб.: Издательство СЗКЭО, 224 с.

- Портал радиоэлектроники 2025. Расчет и подбор сопротивления токоограничивающего резистора для светодиода. [URL: <https://interlavka.su/articles/raschet-i-podbor-soprotivleniya-tokoogranichivayuschego-rezistora-dlya-svetodioda>] (дата обращения 28.03.2025).
- Розенберг Г. В. 1963. Сумерки. М.: Физматгиз, 380 с.
- Семеренко С. А., Бушнева Н. А. 2018. Применение феромонных ловушек на яровом рапсе для учета численности капустной моли. Масличные культуры **4**: 172–177.
- Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. 2003. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 474 с.
- Форум 4PDA [Интернет-документ]. 2025. Смартфон — болят глаза. Помогите с выбором. Выбор смартфона с комфортным экраном. [URL: <https://4pda.to/forum/index.php?showtopic=943228&st=16120>] (дата обращения 28.03.2025).
- Фролов А. Н. 2022. Управление поведением вредных насекомых: световые, химические сигналы и их совместное действие. Энтомологическое обозрение **101** (3): 453–502.
<https://doi.org/10.31857/S0367144522030017>
- Фролов А. Н., Грушевая И. В., Конончук А. Г. 2021. Современные типы ловушек для мониторинга чешуекрылых на примере кукурузного мотылька. Монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 120 с.
- Фролов А. Н., Захарова Ю. А., Малыш С. М. 2024. Сквозь сумерки к свету: новый взгляд на вариативность поведенческих реакций яблонной плодожорки. Вестник защиты растений **107** (2): 40–74.
<https://doi.org/10.31993/2308-6459-2024-107-2-16612>
- Чернышев В. Б. 1996. Экология насекомых. М.: МГУ, 304 с.
- Черятева М. И., Ходаков П. Е. 2022. Использование феромонных ловушек для контроля численности бабочек капустной моли. В кн.: О. С. Харалгина (ред.). Достижения аграрной науки для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации. Сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Тюмень: Государственный агроуниверситет Северного Зауралья, с. 197–202.
- Шпанев А. М. 2021. Новые случаи массового размножения капустной моли. Защита и карантин растений **4**: 27–30.
https://doi.org/10.47528/1026-8634_2021_4_27
- Шпанев А. М. 2023. Особенности развития и вредоносность капустной моли (*Plutella xylostella* (L.); Lepidoptera, Plutellidae) на посевах ярового рапса в Ленинградской области. Энтомологическое обозрение **102** (2): 231–240.
<https://doi.org/10.31857/S036714452302003X>
- Agee H. R. 1971. Flicker fusion frequency of the compound eye of *Heliothis zea* (Lepidoptera: Noctuidae). Annals of the Entomological Society of America **64** (4): 942–945.
<https://doi.org/10.1093/aesa/64.4.942>
- Agelopoulos N., Birkett M. A., Hick A. J., Hooper A. M., Pickett J. A., Pow E. M., Smart L. E., Smiley D. W. M., Wadhams L. J., Woodcock C. M. 1999. Exploiting semiochemicals in insect control. Pesticide Science **55** (3): 225–235.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9063\(199903\)55:3%3C225::AID-PS887%3E3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9063(199903)55:3%3C225::AID-PS887%3E3.0.CO;2-7)
- Ahirwar M. K., Vaishampayan S., Vishwakarma D., Tiwari H. 2023. Comparative analysis of UV and UVLED light traps for pest control: a cost-efficiency perspective. International Journal of Plant & Soil Science **35** (22): 923–934.
<https://doi.org/10.9734/IJPSS/2023/v35i224203>
- Ahrens C. D., Henson R. 2019. Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment, 12th Edition. Boston: Cengage Learning, 656 p.
- Baker A., Cosens D. 1983. Flicker-response enhancement in ‘fast-eyed’ insects. Journal of Insect Physiology **29** (2): 177–186.
[https://doi.org/10.1016/0022-1910\(83\)90142-7](https://doi.org/10.1016/0022-1910(83)90142-7)
- Baker P. B., Shelton A. M., Andalaro J. T. 1982. Monitoring of diamondback moth (Lepidoptera: Yponomeutidae) in cabbage with pheromones. Journal of Economic Entomology **75** (6): 1025–1028.
<https://doi.org/10.1093/jee/75.6.1025>
- Bantis F., Smirnakou S., Ouzounis T., Koukounaras A., Ntagkas N., Radoglou K. 2018. Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs). Scientia Horticulturae **235**: 437–451.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.058>
- Barroso A., Haifig I., Janei V., Da Silva I., Dietrich C., Costa-Leonardo A. M. 2017. Effects of flickering light on the attraction of nocturnal insects. Lighting Research & Technology **49** (1): 100–110.
<https://doi.org/10.1177/1477153515602143>
- Bessho M., Shimizu K. 2012. Latest trends in LED lighting. Electronics and Communications in Japan **95** (1): 1–7.
<https://doi.org/10.1002/ecj.10394>

- Blüthgen N., Dicks L. V., Forister M. L., Outhwaite C. L., Slade E. M. 2023. Insect declines in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment* **4** (10): 683–686.
<https://doi.org/10.1038/s43017-023-00478-x>
- Boström J. E., Dimitrova M., Canton C., Håstad O., Qvarnström A., Ödeen A. 2016. Ultra-rapid vision in birds. *PLoS One* **11** (3): e0151099.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151099>
- Bourget C. M. 2008. An introduction to light-emitting diodes. *HortScience* **43** (7): 1944–1946.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1944>
- Bowden J. 1982. An analysis of factors affecting catches of insects in light-traps. *Bulletin of Entomological Research* **72** (4): 535–556.
<https://doi.org/10.1017/S0007485300008579>
- Bowden J. 1984. Latitudinal and seasonal changes of nocturnal illumination with a hypothesis about their effect on catches of insects in light-traps. *Bulletin of Entomological Research* **74** (2): 279–298.
<https://doi.org/10.1017/S0007485300011408>
- Boyes D. H., Evans D. M., Fox R., Parsons M. S., Pocock M. J. 2021. Is light pollution driving moth population declines? A review of causal mechanisms across the life cycle. *Insect Conservation and Diversity* **14** (2): 167–187.
<https://doi.org/10.1111/icad.12447>
- Brady D., Saviane A., Cappellozza S., Sandrelli F. 2021. The circadian clock in Lepidoptera. *Frontiers in Physiology* **12**: 776826.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2021.776826>
- Brehm G. 2017. A new LED lamp for the collection of nocturnal Lepidoptera and a spectral comparison of light-trapping lamps. *Nota Lepidopterologica* **40** (1): 87–108.
<https://doi.org/10.3897/nl.40.11887>
- Briscoe A. D., Chittka L. 2001. The evolution of color vision in insects. *Annual Review of Entomology* **46** (1): 471–510.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ento.46.1.471>
- Brundrett G. W. 1974. Human sensitivity to flicker. *Lighting Research & Technology* **6** (3): 127–143.
<https://doi.org/10.1177/096032717400600302>
- Bugbee B. 2017. Economics of LED lighting. In: S. D. Gupta (ed.). *Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting*. Singapore: Springer Nature, p. 81–99.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_5
- Chen Y. X., Tian H. J., Wei H., Zhan Z. X., Huang Y. Q. 2011. A simple method for identifying sex of *Plutella xylostella* (Linnaeus) larva, pupa and adult. *Fujian Journal of Agricultural Sciences* **26** (4): 611–614.
- Chi D. T., Le Thi H., Le V. V., Thy T. T., Yamamoto M., Ando T. 2024. Mass trapping of the diamondback moth (*Plutella xylostella* L.) by a combination of its sex pheromone and allyl isothiocyanate in cabbage fields in southern Vietnam. *Journal of Pesticide Science* **49** (1): 15–21.
<https://doi.org/10.1584/jpestics.D23-042>
- Clark D. A., Demb J. B. 2016. Parallel computations in insect and mammalian visual motion processing. *Current Biology* **26** (20): R1062–R1072.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.08.003>
- Cohnstaedt L. W., Gillen J. I., Munstermann L. E. 2008. Light-emitting diode technology improves insect trapping. *Journal of the American Mosquito Control Association* **24** (2): 331–334.
<https://doi.org/10.2987/2F5619.1>
- Coulson S. J., Hodkinson I. D., Webb N. R., Mikkola K., Harrison J. A., Pedgley D. E. 2002. Aerial colonization of high Arctic islands by invertebrates: the diamondback moth *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) as a potential indicator species. *Diversity and Distributions* **8** (6): 327–334.
<https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2002.00157.x>
- Couty A., Van Emden H., Perry J. N., Hardie J., Pickett J. A., Wadham L. J. 2006. The roles of olfaction and vision in host-plant finding by the diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Physiological Entomology* **31** (2): 134–145.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.2006.00499.x>
- Crozier W. J., Wolf E., Zerrahn-Wolf G. 1937a. Critical illumination and critical frequency for response to flickered light, in dragonfly larvae. *Journal of General Physiology* **20** (3): 363–392.
<https://doi.org/10.1085/jgp.20.3.363>
- Crozier W. J., Wolf E., Zerrahn-Wolf G. 1937b. Intensity and critical frequency for visual flicker. *Journal of General Physiology* **21** (2): 203–221.
<https://doi.org/10.1085/jgp.21.2.203>
- Davidson P. 2015. *The Last of the Light about Twilight*. London: Reaktion Books Ltd, 208 p.
- Davis J., Hsieh Y. H., Lee H. C. 2015. Humans perceive flicker artifacts at 500 Hz. *Scientific Reports* **5** (1): 7861.
<https://doi.org/10.1038/srep07861>

- De Causmaecker L., Mentens A., Aerts S., Vanschoenwinkel B., Moortgat R., Van Den Bossche P., Jacobs V. A. 2022. Development of a control system to evaluate the impact of artificial light modulation on insects. In: Proceedings of the CIE Symposium on Advances on the Measurement of Temporal Light Modulation. Commission Internationale de L'Eclairage (CIE), p. 31–39.
<https://doi.org/10.25039/x49.2022.P07>
- De Causmaecker L., Mentens A., Segers L., Van Den Bossche P., Vanschoenwinkel B., Jacobs V. A. 2023. Towards public LED lighting with minimal impact on insect movement. In: Proceedings of the 30th CIE SESSION. Vienna: Commission Internationale de L'Eclairage (CIE), p. 291–300.
<https://doi.org/10.25039/x50.2023.OP044>
- Dent D., Binks R. H. 2020. Insect Pest Management, 3rd Edition. Oxfordshire, UK; Boston, USA: CAB International, 408 p.
- Di Lollo V., Hogben J. H. 1985. Suppression of visible persistence. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance 11 (3): 304–316.
<https://doi.org/10.1037/0096-1523.11.3.304>
- Di Lollo V., Hogben J. H. 1987. Suppression of visible persistence as a function of spatial separation between inducing stimuli. Perception & Psychophysics 41: 345–354.
<https://doi.org/10.3758/BF03208236>
- Donner K. 2021. Temporal vision: measures, mechanisms and meaning. Journal of Experimental Biology 224 (15): jeb222679.
<https://doi.org/10.1242/jeb.222679>
- Evenden M. L., Gries R. 2010. Assessment of commercially available pheromone lures for monitoring diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) in canola. Journal of Economic Entomology 103 (3): 654–661.
<https://doi.org/10.1603/EC09339>
- Fathipour Y., Mirhosseini M. A. 2017. Diamondback moth (*Plutella xylostella*) management. In: G. V. P. Reddy (ed.). Integrated Management of Insect Pests on Canola and Other Brassica Oilseed Crops. Oxfordshire (UK), Boston (USA): CAB International, p. 13–43.
<https://doi.org/10.1079/9781780648200.0013>
- Forister M. L., Pelton E. M., Black S. H. 2019. Declines in insect abundance and diversity: we know enough to act now. Conservation Science and Practice 1 (8): e80.
<https://doi.org/10.1111/csp2.80>
- Foster S. P., Harris M. O. 1997. Behavioral manipulation methods for insect pest management. Annual Review of Entomology 42: 123–146.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ento.42.1.123>
- Furlong M. J., Pell J. K., Choo O. P., Rahman S. A. 1995. Field and laboratory evaluation of a sex pheromone trap for the autodissemination of the fungal entomopathogen *Zoophthora radicans* (Entomophthorales) by the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae). Bulletin of Entomological Research 85 (3): 331–337.
<https://doi.org/10.1017/S0007485300036051>
- Furlong M. J., Wright D. J., Dosdall L. M. 2013. Diamondback moth ecology and management: problems, progress, and prospects. Annual Review of Entomology 58: 517–541.
<https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120811-153605>
- Galimov V. [Интернет-документ]. 2020. White nights in St. Petersburg. Itmo/News. [URL: https://news.itmo.ru/en/features/experience_saint_petersburg/news/9447] (22 May 2020).
- Gonzalez F., Rodríguez C., Oehlschlager C. 2023. Economic benefits from the use of mass trapping in the management of diamondback moth, *Plutella xylostella*, in Central America. Insects 14 (2): 149.
<https://doi.org/10.3390/insects14020149>
- Goodwin S., Danthanarayana W. 1984. Flight activity of *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae). Australian Journal of Entomology 23 (3): 235–240.
<https://doi.org/10.1111/j.1440-6055.1984.tb01952.x>
- Graf R. F., Sheets W. 1996. Encyclopedia of Electronic Circuits, Vol. 6. New York et al.: McGraw-Hill, 789 p.
- Gross J., Franco J. C. 2022. Novel trends on semiochemicals and semiophysicals for insect science and management. Entomologia Generalis 42 (2): 163–165.
<https://doi.org/10.1127/entomologia/2022/1535>
- Hallett R. H., Angerilli N. P. D., Borden J. H. 1995. Potential for a sticky trap monitoring system for the diamondback moth (Lepidoptera: Yponomeutidae) on cabbages in Indonesia. International Journal of Pest Management 41 (4): 205–207.
<https://doi.org/10.1080/09670879509371950>
- Hänel A., Posch T., Ribas S. J., Aubé M., Duriscoe D., Jechow A., Kollath Z., Lolkema D. E., Moore C., Schmidt N., Spoelstra H., Wuchterl G., Kyba C. C. 2018. Measuring night sky brightness: methods and challenges. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 205: 278–290.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.008>

- Harcourt D. G. 1957. Biology of the diamondback moth, *Plutella maculipennis* (Curt.) (Lepidoptera: Plutellidae), in Eastern Ontario. II. Life-history, behaviour, and host relationships. The Canadian Entomologist **89** (12): 554–564. <https://doi.org/10.4039/Ent89554-12>
- He X. D., Chen W., Liu T. X. 2003. Attraction of diamondback moth to three commercial sex pheromone lures under laboratory and field conditions. Southwestern Entomologist **28** (2): 105–114.
- Hermes W. B., Ellsworth J. K. 1934. Field tests of the efficacy of colored light in trapping insect pests. Journal of Economic Entomology **27** (5): 1055–1067. <https://doi.org/10.1093/jee/27.5.1055>
- Infusino M., Brehm G., Di Marco C., Scalercio S. 2017. Assessing the efficiency of UV LEDs as light sources for sampling the diversity of macro-moths (Lepidoptera). European Journal of Entomology **114**: 25–33. <https://doi.org/10.14411/eje.2017.004>
- Inger R., Bennie J., Davies T., Gaston K. 2014. Potential biological and ecological effects of flickering artificial light. PLoS One **9** (5): e98631. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098631>
- Jander R. 1963. Insect orientation. Annual Review of Entomology **8**: 95–114. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.08.010163.000523>
- Jägerbrand A. K. 2018. LED-belysningens Effekter på Djur och Natur Med Rekommendationer: Fokus på Nordiska Förhållanden och Känsliga Arter och Grupper. Linköping: Calluna AB, 121 p.
- Justus K. A., Mitchell B. K. 1999. Reproductive morphology, copulation, and inter-population variation in the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae). International Journal of Insect Morphology and Embryology **28** (3): 233–246. [https://doi.org/10.1016/S0020-7322\(99\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7322(99)00027-6)
- Kammar V., Rani A. T., Kumar K. P., Chakravarthy A. K. 2020. Light trap: a dynamic tool for data analysis, documenting, and monitoring insect populations and diversity. In: A. K. Chakravarthy (ed.). Innovative Pest Management Approaches for the 21st Century: Harnessing Automated Unmanned Technologies. Singapore: Springer Nature Singapore, p. 137–163. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0794-6_8
- Kanervo V. 1936. Kaalikoi (*Plutella maculipennis* Curt.) ristikukkaiskasvien tuholaisena Suomessa. Valtion Maatalouskoetöiminnan Julkaisuja **86**: 1–86.
- Kim K. N., Huang Q. Y., Lei C. L. 2019. Advances in insect phototaxis and application to pest management: a review. Pest Management Science **75** (12): 3135–3143. <https://doi.org/10.1002/ps.5536>
- Kim M. 2021. Assessment of the effect on the human body of the flicker of OLED displays of smartphones. Journal of Information Display **22** (4): 269–274. <https://doi.org/10.1080/15980316.2021.1950854>
- Kondratyev K. Y. 1969. Radiation in the Atmosphere. International Geophysics Series, vol. 12. New York, London: Academic Press, 929 p.
- Kristensen N. P., Scoble M. J., Karsholt O. 2007. Lepidoptera phylogeny and systematics: the state of inventorying moth and butterfly diversity. Zootaxa **1668** (1): 699–747. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.1668.1.30>
- Kurgansky A. M. 2024. Pulse-width modulation as a new hygienic factor determining the visual comfort of modern screens. Russian Bulletin of Hygiene **1**: 48–53. <https://doi.org/10.24075/rbh.2024.093>
- Kuwahara M., Keinmeesuke P., Shirai Y. 1996. Monitoring field populations with pheromone trap and seasonal trend of adult body size of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae), in Central Thailand. Japan International Research Center for Agricultural Sciences Journal **3**: 17–22.
- Lafitte A., Sordello R., Legrand M., Nicolas V., Obein G., Reyjol Y. 2022. A flashing light may not be that flashy: a systematic review on critical fusion frequencies. PLoS One **17** (12): e0279718. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279718>
- Lafitte A., Sordello R., Legrand M., Nicolas V., Obein G., Reyjol Y. 2023. Does a flashing artificial light have more or conversely less impacts on animals than a continuous one? A systematic review. Nature Conservation **54**: 149–177. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.54.102614>
- Landis C. 1954. Determinants of the critical flicker-fusion threshold. Physiological Reviews **34** (2): 259–286. <https://doi.org/10.1152/physrev.1954.34.2.259>
- Leinert C., Bowyer S., Haikala L. K., Hanner M. S., Hauser M. G., Levasseur-Regourd A. C., Mann I., Mattila K., Reach W. T., Schlosser W., Staude H. J., Toller G. N., Weiland J. L., Weinberg J. L., Witt A. N. 1998. The 1997 reference of diffuse night sky brightness. Astronomy and Astrophysics Supplement Series **127** (1): 1–99.

- Leinonen R., Söderman G., Itämiä J., Rytönen S., Rutanen I. 1998. Intercalibration of different light-traps and bulbs used in moth monitoring in northern Europe. *Entomologica Fennica* **9** (1): 37–51.
<https://doi.org/10.33338/ef.83965>
- Lewis T., Taylor L. R. 1965. Diurnal periodicity of flight by insects. *Transactions of the Royal Entomological Society of London* **166** (15): 393–479.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.1965.tb02304.x>
- Li P., Zhu J., Qin Y. 2012. Enhanced attraction of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) to pheromone-baited traps with the addition of green leaf volatiles. *Journal of Economic Entomology* **105** (4): 1149–1156.
<https://doi.org/10.1603/EC11109>
- Linares Arroyo H., Abascal A., Degen T., Aubé M., Espey B. R., Gyuk G., Hölker F., Jechow A., Kuffer M., Sánchez de Miguel A., Simoneau A., Walczak K., Kyba C. C. M. 2024. Monitoring, trends and impacts of light pollution. *Nature Reviews Earth & Environment* **5** (6): 417–430.
<https://doi.org/10.1038/s43017-024-00555-9>
- Lincoln B. 2009. *Sunlight at Midnight: St. Petersburg and the Rise of Modern Russia*. New York: Basic Books, 432 p.
- Lisney T. J., Ekesten B., Tauson R., Håstad O., Ödeen A. 2012. Using electroretinograms to assess flicker fusion frequency in domestic hens *Gallus gallus domesticus*. *Vision Research* **62**: 125–133.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2012.04.002>
- Lisney T. J., Rubene D., Róza J., Løvlie H., Håstad O., Ödeen A. 2011. Behavioural assessment of flicker fusion frequency in chicken *Gallus gallus domesticus*. *Vision Research* **51** (12): 1324–1332.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.04.009>
- Liu Y. N., Liu Y. J., Chen Y. C., Ma H. Y., Lee H. Y. 2017. Enhancement of mosquito trapping efficiency by using pulse width modulated light emitting diodes. *Scientific Reports* **7** (1): e40074.
<https://doi.org/10.1038/srep40074>
- Longcore T. [Интернет-документ]. 2023. Effects of LED Lighting on Terrestrial Wildlife. Report No TR0003 (REV 10/98). Los Angeles: University of California, Institute of the Environment and Sustainability. March 31, 2023. 184 p. [URL: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/77718>]
- Mankowska N. D., Marcinkowska A. B., Waskow M., Sharma R. I., Kot J., Winkowski P. J. 2021. Critical flicker fusion frequency: a narrative review. *Medicina* **57** (10): 1096.
<https://doi.org/10.3390/medicina57101096>
- Mason P. 2022. *Plutella xylostella* (diamondback moth). CABI Compendium. Wallingford, UK: CAB International, 39 p. [URL: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.1079/cabicompendium.42318>]
- Mazzoni V., Anfora G. 2021. Behavioral manipulation for pest control. *Insects* **12** (4): 287.
<https://doi.org/10.3390/insects12040287>
- Meyer-Rochow V. B. 2001. The crustacean eye: dark/light adaptation, polarization sensitivity, flicker fusion frequency, and photoreceptor damage. *Zoological Science* **18** (9): 1175–1197.
<https://doi.org/10.2108/zsj.18.1175>
- Mikkola K. 1972. Behavioural and electrophysiological responses of night-flying insects, especially Lepidoptera, to near-ultraviolet and visible light. *Annales Zoologici Fennici* **9**: 225–254.
- Miluch C. E., Dossall L. M., Evenden M. L. 2013. The potential for pheromone-based monitoring to predict larval populations of diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.), in canola (*Brassica napus* L.). *Crop Protection* **45**: 89–97.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.11.023>
- Miluch C. E., Dossall L. M., Evenden M. L. 2014. Factors influencing male *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) capture rates in sex pheromone-baited traps on canola in western Canada. *Journal of Economic Entomology* **107** (6): 2067–2076.
<https://doi.org/10.1603/EC13371>
- Niepoth N., Ke G., de Roode J. C., Groot A. T. 2018. Comparing behavior and clock gene expression between caterpillars, butterflies and moths. *Journal of Biological Rhythms* **33** (1): 52–64.
<https://doi.org/10.1177/0748730417746458>
- Nieri R., Anfora V., Mazzoni V., Rossi Stacconi M. V. 2022. Semiochemicals, semiophysicals and their integration for the development of innovative multi-modal systems for agricultural pests' monitoring and control. *Entomologia Generalis* **42** (2): 167–183.
<https://doi.org/10.1127/entomologia/2021/1236>
- Niermann J., Brehm G. 2022. The number of moths caught by light traps is affected more by microhabitat than the type of UV lamp used in a grassland habitat. *European Journal of Entomology* **119**: 36–42.
<https://doi.org/10.14411/eje.2022.004>
- Nofemela R. S. 2010. The ability of synthetic sex pheromone traps to forecast *Plutella xylostella* infestations depends on survival of immature stages. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **136** (3): 281–289.
<https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2010.01029.x>
- Nowinsky L. (ed.). 2003. *The Handbook of Light Trapping*. Szombathely: Savaria University Press, Hungary, 276 p.

- Nowinszky L., Mészáros Z., Puskás J. 2008. The beginning and the end of the insects' flight towards the light according to different environmental lightings. *Applied Ecology and Environmental Research* **6** (2): 137–145. https://doi.org/10.15666/aeer/0602_135143
- Owens A. C., Cochard P., Durrant J., Farnworth B., Perkin E. K., Seymoure B. 2020. Light pollution is a driver of insect declines. *Biological Conservation* **241**: 108259. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108259>
- Owens A. C., Lewis S. M. 2018. The impact of artificial light at night on nocturnal insects: a review and synthesis. *Ecology and Evolution* **8** (22): 11337–11358. <https://doi.org/10.1002/ece3.4557>
- Park J. H., Lee H. S. 2017. Phototactic behavioral response of agricultural insects and stored-product insects to light-emitting diodes (LEDs). *Applied Biological Chemistry* **60**: 137–144. <https://doi.org/10.1007/s13765-017-0263-2>
- Pell J. K., Macaulay E. D. M., Wilding N. 1993. A pheromone trap for dispersal of the pathogen *Zoophthora radicans* Brefeld. (Zygomycetes: Entomophthorales) amongst populations of the diamondback moth, *Plutella xylostella* L. (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Biocontrol Science and Technology* **3** (3): 315–320. <https://doi.org/10.1080/09583159309355286>
- Pivnick K. A., Jarvis B. J., Gillott C., Slater G. P., Underhill E. W. 1990. Daily patterns of reproductive activity and the influence of adult density and exposure to host plants on reproduction in the diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). *Environmental Entomology* **19** (3): 587–593. <https://doi.org/10.1093/ee/19.3.587>
- Powell J. A. 2009. Lepidoptera: moths, butterflies. In: V. H. Resh, R. T. Cardé (eds). *Encyclopedia of Insects*, 2nd Edition. New York, London: Academic Press, p. 559–587. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374144-8.00160-0>
- Prabaningrum L., Moekasan T. K. 2021. Use of light trap for controlling cabbage pests. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **752** (1): 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/752/1/012027>
- Price P. W. 1997. *Insect Ecology*, 3rd Edition. New York et al.: John Wiley & Sons, 888 p.
- Railton R. C. R., Foster T. M., Temple W. 2009. A comparison of two methods for assessing critical flicker fusion frequency in hens. *Behavioural Processes* **80** (2): 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2008.11.016>
- Reddy G. V. P., Guerrero A. 2000. Pheromone-based integrated pest management to control the diamondback moth *Plutella xylostella* in cabbage fields. *Pest Management Science* **56** (10): 882–888. [https://doi.org/10.1002/1526-4998\(200010\)56:10%3C882::AID-PS226%3E3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/1526-4998(200010)56:10%3C882::AID-PS226%3E3.0.CO;2-T)
- Reddy G. V. P., Guerrero A. 2001. Optimum timing of insecticide applications against diamondback moth *Plutella xylostella* in cole crops using threshold catches in sex pheromone traps. *Pest Management Science* **57** (1): 90–94. [https://doi.org/10.1002/1526-4998\(200101\)57:1%3C90::AID-PS258%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1526-4998(200101)57:1%3C90::AID-PS258%3E3.0.CO;2-N)
- Reddy G. V. P., Urs K. C. D. 1996. Studies on the sex pheromone of the diamondback moth *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) in India. *Bulletin of Entomological Research* **86** (5): 585–590. <https://doi.org/10.1017/S0007485300039389>
- Reddy G. V. P., Urs K. C. D. 1997. Mass trapping of diamondback moth *Plutella xylostella* in cabbage fields using synthetic sex pheromones. *International Pest Control* **39** (4): 125–126.
- Rhainds M. 2024. Mass trapping lepidopteran pests with light traps, with focus on tortricid forest pests: what if? *Insects* **15** (4): 267. <https://doi.org/10.3390/insects15040267>
- Roach F. E., Gorden J. L. 1973. *The Light of the Night Sky*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 138 p.
- Robinson H. S. 1952. On the behaviour of night-flying insects in the neighbourhood of a bright source of light. *Proceedings of the Royal Entomological Society of London. Series A, General Entomology* **27** (1–3): 13–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.1952.tb00139.x>
- Saint S. E., Hammond B. R., Khan N. A., Hillman C. H., Renzi-Hammond L. M. 2019. Temporal vision is related to cognitive function in preadolescent children. *Applied Neuropsychology: Child* **10** (4): 319–326. <https://doi.org/10.1080/21622965.2019.1699096>
- Sanes J. R., Zipursky S. L. 2010. Design principles of insect and vertebrate visual systems. *Neuron* **66** (1): 15–36. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.01.018>
- Saunders D. S. 2002. *Insect Clocks*. 3rd Edition. Amsterdam et al.: Elsevier, 576 p.
- Schubert E. F. 2006. *Light-Emitting Diodes*, 2nd Edition. Cambridge et al.: Cambridge University Press, 434 p.
- Shimoda M., Honda K. 2013. Insect reactions to light and its applications to pest management. *Applied Entomology and Zoology* **48**: 413–421. <https://doi.org/10.1007/s13355-013-0219-x>

- Shirai Y. 1991. Seasonal changes and effects of temperature on flight ability of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Applied Entomology and Zoology* **26** (1): 107–115.
<https://doi.org/10.1303/aez.26.107>
- Shirai Y., Nakamura A. 1995. Relationship between the number of wild males captured by sex pheromone trap and the population density estimated from a mark-recapture study in the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Applied Entomology and Zoology* **30** (4): 543–549.
<https://doi.org/10.1303/aez.30.543>
- Sulifoa J. B., Ebenebe A. A. 2007. Evaluation of pheromone trapping of diamondback moth (*Plutella xylostella*) as a tool for monitoring larval infestations in cabbage crops in Samoa. *The South Pacific Journal of Natural and Applied Sciences* **25** (1): 43–46.
<https://doi.org/10.1071/SP07007>
- Suresh S., Chandrasekaran S., Babu P. C. 1989. Studies on pheromone and light trap for the attraction of diamondback moth *Plutella xylostella*. *South Indian Horticulture* **37** (6): 353–354.
- Syed I., Muthuraju G. P., Doddabasappa B., Sudarshan G. K., Sahida A., Chakravarthy A. K. 2019. Standardization of height and density of pheromone traps for mass trapping diamond back moth, *Plutella xylostella* (L.) in cabbage. *Journal of Entomology and Zoology Studies* **7** (1): 1049–1052.
- Szentkirályi F. 2002. Fifty-year-long insect survey in Hungary: T. Jermy's contributions to light-trapping. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae* **48** (Suppl 1): 85–105.
- Tarigan R., Asgar A., Moekasan T. K., Prabaningrum L., Hutabarat R. C., Marpaung A. E., Rosliani R., Karo B. B., Aryani D. S. 2024. The potential of light and pheromone traps for controlling main pests in cabbage. *AIP Conference Proceedings* **2957** (1): 090034.
<https://doi.org/10.1063/5.0184520>
- Topagi S. C., Bhanu K. R. M., Kumar C. T. A. 2018. Mass trapping technique using pheromones: a standalone method for management of diamondback moth, *Plutella xylostella* (Linnaeus) (Plutellidae: Lepidoptera) in cabbage. *International Journal of Applied Science and Engineering* **15** (3): 211–232.
[https://doi.org/10.6703/IJASE.201812_15\(3\).211](https://doi.org/10.6703/IJASE.201812_15(3).211)
- Truxa C., Fiedler K. 2012. Attraction to light — from how far do moths (Lepidoptera) return to weak artificial sources of light? *European Journal of Entomology* **109** (1): 77–84.
<https://doi.org/10.14411/eje.2012.010>
- Turner W. B. 1918. Female Lepidoptera at light traps. *Journal of Agricultural Research* **14** (3): 135–149.
- Tyler C. J., Mahajan S., Smith L., Okamoto H., Wijnen H. 2025. Adult diel locomotor behaviour in the agricultural pest *Plutella xylostella* reflects temperature-driven and light-repressed regulation rather than coupling to circadian clock gene rhythms. *Insects* **16** (2): 182.
<https://doi.org/10.3390/insects16020182>
- Umeton D., Read J. C. A., Rowe C. 2017. Unravelling the illusion of flicker fusion. *Biology Letters* **13** (2): 20160831.
<https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0831>
- van Deijk J. R., Wever R., van der Heide S. R., Boers J., van Deijl I. H. J., van Grunsven R. H. A. 2024. UV–LEDs outperform actinics for standalone moth monitoring. *Journal of Insect Conservation* **28** (5): 959–968.
<https://doi.org/10.1007/s10841-024-00568-1>
- van der Kooi C. J., Stavenga D. G., Arikawa K., Belušić G., Kelber A. 2021. Evolution of insect color vision: from spectral sensitivity to visual ecology. *Annual Review of Entomology* **66** (1): 435–461.
<https://doi.org/10.1146/annurev-ento-061720-071644>
- van Grunsven R. H., van Deijk J. R., Donners M., Berendse F., Visser M. E., Veenendaal E., Spoelstra K. 2020. Experimental light at night has a negative long-term impact on macro-moth populations. *Current Biology* **30** (12): R694–R695.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.04.083>
- Vickers R. A., Furlong M. J., White A., Pell J. K. 2004. Initiation of fungal epizootics in diamondback moth populations within a large field cage: proof of concept for auto-dissemination. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **111** (1): 7–17.
<https://doi.org/10.1111/j.0013-8703.2004.00140.x>
- Wagner D. L., Grames E. M., Forister M. L., Berenbaum M. R., Stopak D. 2021. Insect decline in the Anthropocene: death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **118** (2): e2023989118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2023989118>
- Wainwright C., Jenkins S., Wilson D., Elliott M., Jukes A., Collier R. 2020. Phenology of the diamondback moth (*Plutella xylostella*) in the UK and provision of decision support for *Brassica* growers. *Insects* **11** (2): 118.
<https://doi.org/10.3390/insects11020118>
- Walker G. P., Wallace A. R., Bush R., MacDonald F. H., Suckling D. M. 2003. Evaluation of pheromone trapping for prediction of diamondback moth infestations in vegetable brassicas. *New Zealand Plant Protection* **56**: 180–184.
<https://doi.org/10.30843/nzpp.2003.56.6039>

- Wang D., Yang G., Chen W. 2021. Diel and circadian patterns of locomotor activity in the adults of diamondback moth (*Plutella xylostella*). *Insects* **12** (8): 727.
<https://doi.org/10.3390/insects12080727>
- Wang X. P., Le V. T., Fang Y. L., Zhang Z. N. 2004. Trap effect on the capture of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) with sex pheromone lures in cabbage fields in Vietnam. *Applied Entomology and Zoology* **39** (2): 303–309.
<https://doi.org/10.1303/aez.2004.303>
- Warrant E. J. 2017. The remarkable visual capacities of nocturnal insects: vision at the limits with small eyes and tiny brains. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **372** (1717): 20160063.
<http://doi.org/10.1098/rstb.2016.0063>
- Warrant E., Somanathan H. 2022. Colour vision in nocturnal insects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **377** (1862): 20210285.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0285>
- Wikipedia [Интернет-документ]. 2024. Talbot–Plateau law. [URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Talbot-Plateau_law].
- Wilcoxon F. 1945. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin* **1** (6): 80–83.
<https://doi.org/10.2307/3001968>
- Williams C. B. 1939. An analysis of four years captures of insects in a light trap. Part I. General survey; sex proportion; phenology; and time of flight. *Transactions of the Royal Entomological Society of London* **89** (6): 79–131.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.1939.tb00738.x>
- Williams C. B. 1948. The Rothamsted light trap. *Proceedings of the Royal Entomological Society of London, Series A* **23**: 80–85.
- Winder S. 2017. Power Supplies for LED Driving, 2nd Edition. Kidlington, Oxford: Newnes, 320 p.
- Witzgall P., Kirsch P., Cork A. 2010. Sex pheromones and their impact on pest management. *Journal of Chemical Ecology* **36** (1): 80–100.
<https://doi.org/10.1007/s10886-009-9737-y>
- Wolf E. 1933. Critical frequency of flicker as a function of intensity of illumination for the eye of the bee. *Journal of General Physiology* **17** (1): 7–19.
<https://doi.org/10.1085/jgp.17.1.7>
- Wu Z., Wang L., Tu Y., Sun Y. 2023. Effect of PWM dimming frequency of OLED smartphones on visual fatigue. *International Conference on Display Technology* **54** (S1): 379–382.
<https://doi.org/10.1002/sdtp.16308>
- Yun C. N., Maeng I. S., Yang S. H., Hwang U. J., Kim K. N., Kim K. C., Ho K. C., Ri C. S., Yang H. S., Jang S. H. 2023. Evaluating the phototactic behavior responses of the diamondback moth, *Plutella xylostella*, to some different wavelength LED lights in laboratory and field. *Journal of Asia-Pacific Entomology* **26** (3): 102080.
<https://doi.org/10.1016/j.aspen.2023.102080>
- Zahoor S., Pathania S. S., Ali I., Anees M., Ayoub L., Kishore G. 2023. Advancing integrated pest management: utilizing pheromone traps for population monitoring of *Plutella xylostella* in cole crops. *International Journal of Environment and Climate Change* **13** (10): 4435–4443.
<https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i103121>

HIGH-FREQUENCY PULSED POWER SUPPLY OF LEDS AS A WAY TO INCREASE COLLECTIONS OF NIGHT-FLYING INSECTS WITH LIGHT TRAPS USING DIAMONDBACK MOTH, *PLUTELLA XYLOSTELLA* (L.) (LEPIDOPTERA, PLUTELLIDAE) AS AN EXAMPLE

Yu. A. Zakharova, A. A. Miltsen, A. N. Frolov

Key words: light, flicker, phototaxis, twilight, white nights, trapping.

SUMMARY

Traps equipped with low-power LEDs are very promising for use in insect pest control due to their safety for the non-target entomofauna. However, the level of natural illumination at night at high latitudes varies greatly and the attractiveness of low-power LEDs in early summer (i.e. during the period of white nights) becomes too weak to ensure acceptable catch of harmful insects in traps. The pur-

pose of this article is to illustrate a successful attempt, using the example of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.), to enhance the attractive effect of low-power LEDs by replacing their direct current supply with a high-frequency pulsed (30 kHz) power supply. Diamondback moth adults were collected in the vicinity of St. Petersburg in 2020–2024 using Delta plastic traps equipped with LEDs and a synthetic sex attractant as a control. The results obtained proved that upgrade of LEDs power supply provides significant increase in diamondback moth adult catch by light traps, exactly 4.57 times during the period of white nights, 3.11 times during the dark nights following them, and 4.45 times during the summer as a whole. The results achieved are important not only from a practical point of view, but also have theoretical value, since the effect of flickering light on insect behaviour has been very insufficiently studied.