

## РОЛЬ ТЕРМОАДАПТАЦИИ В РАСПРОСТРАНЕНИИ ТОМАТНОЙ МИНИРУЮЩЕЙ МОЛИ *TUTA ABSOLUTA*

© 2020 Перевертин К.А.<sup>а,\*</sup>, Равашдех Ш.<sup>б,\*\*</sup>, Заец В.Г.<sup>с,\*\*\*</sup>,  
Козлов Д.Н.<sup>д,\*\*\*\*</sup>, Васильева Н.А.<sup>д</sup>, Васильев Т.А.<sup>д</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, 119071, Россия;

<sup>б</sup> Национальный центр развития сельскохозяйственных исследований Королевства Иордания, Амман, 11621, Иордания;

<sup>с</sup> Аграрно-технологический институт ФГБОУ «Российский государственный университет дружбы народов», Москва, 117198, Россия;

<sup>д</sup> Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, 119017, Россия;

e-mail: \*perevertink@mail.ru, \*\*rwashdah@yahoo.com, \*\*\*zaets05@mail.ru, \*\*\*\*kozlov\_dn@esoil.ru

Поступила в редакцию 12.11.2018. После доработки 04.02.2020. Принята к публикации 14.02.2020

Рассмотрена сравнительно недавняя (2006 г.) трансатлантическая инвазия южноамериканской томатной минирующей моли *Tuta absoluta* в Старый Свет.

На основе оценочной термоадаптационной математической модели онтогенеза *T. absoluta* сделан вывод об опасности вредителя не только на защищённых грунтах, но и для плантаций открытого грунта (возможность развития не менее двух генераций для Московской области и не менее четырёх для Краснодарского края).

**Ключевые слова:** *Tuta absoluta*, онтогенез, оценочная математическая модель, биоагрессия агроландшафтов.

### Введение

Рассмотрение вредных организмов как объектов биоинвазии имеет как теоретический интерес в изучении отношений высокоспециализированный вредитель – растение-хозяин, так и важнейшее прикладное значение.

Известный феномен, получивший от историка А. Кросби название «Колумбового обмена» – Columbian exchange» [Crosby, 1989], можно определить как комплекс антропогенных трансатлантических биоинвазий, радикально трансформировавших биоценозы как Старого, так и Нового Света. Активно начавшийся около 500 лет назад, он продолжается до сих пор. Яркий пример – обсуждаемая в данной работе межконтинентальная инвазия томатной минирующей моли *Tuta absoluta* (Meirick, 1917, Povolny, 1994), начавшаяся с катастрофических потерь томатов в Испании в 2006 г. и в кратчайшее время распространившаяся в Евразии и Африке.

Для России результаты жизнедеятельности опасного карантинного объекта – томатной минирующей моли с момента первого сообщения в 2009 г. (г. Калининград) неоднократно реги-

стрируются в различных субъектах Федерации [Ижевский и др., 2011; Равашдех, Заец, 2011; Равашдех, 2014; Перевертин, Заец, 2016], однако, катастрофических последствий на уровне регионов пока не отмечено. Это принято увязывать, в первую очередь, с особенностями термоадаптации вредителя.

При установлении термодетерминантных значений циклов онтогенеза томатной моли исследования проводились в Иордании – регионе средиземноморского распространения *T. absoluta*, где она уже повсеместно присутствует, не являясь объектом ни внешнего, ни внутреннего карантина.

Целью работы является оценка рисков широкомасштабной натурализации томатной моли с построением оценочной математической модели онтогенеза на примере контрастных по климатическим условиям регионов РФ (Московская обл. и Краснодарский край).

### Материалы и методы

Исследования проводили в Королевстве Иордания и в России (г. Москва).

**1) Королевство Иордания.** Основные полевые и камеральные исследования проводились с 2010 по 2013 г. на опытной базе Сельскохозяйственной станции Дейр Алла (Deir Alla) при Национальном Центре развития сельскохозяйственных исследований (г. Эль-Карак) [Равашдех, 2014]. Сбор исходного биоматериала (личинок *T. absoluta*) для лабораторных исследований проводили на растениях томата в полевых условиях и в производственных защищённых грунтах товарных сельхозпроизводителей. В опытах контрольная популяция вредителя (вариант оптимум) поддерживалась в закрытом грунте при температуре 30 °С, влажности 60% и 16-часовом периоде освещения на исходно 1.5-месячных растениях томата. Для опытов рассаду выращивали в пластмассовых сосудах диаметром 9 см на торфо-почвенных смесях (1/1).

Наблюдения за особенностями развития вредителя проводились в лаборатории при соответствующих вариантах опыта температурах и влажности 60%. Соответствующие стадии насекомых размещали в пластмассовых садках с листьями томата, накрытых сверху сетчатой тканью. Имаго подкармливали сахарным сиропом. Отложенные яйца переносили в чашку Петри. Повторность 10-кратная. Учёты проводились ежедневно.

Вылупившиеся личинки *T. absoluta* отбирали в партии по 20 особей и помещали в чашки Петри в трёхкратной повторности для наблюдения за их развитием в условиях лабораторной имитации условий для завершения цикла онтогенеза.

Часть образцов, собранных с тех же полей, также параллельно тестировали в лаборатории при соблюдении термоклиматических условий эксперимента.

**2) г. Москва.** Маршрутные обследования проводились на продовольственных рынках Москвы и в торговых залах сетевых гипермаркетов в 2011–2014 гг. Кроме плодов томатов особое внимание обращалось на тару импортной продукции, где преобладали турецкие и (с 2014 г.) белорусские поставки. Образцы отдельно пакировались и этикетировались. Обнаруженные особи *T. absoluta*, как правило, личинки и имаго, *идентифицировались с использованием лабораторной базы*

*сельскохозяйственного факультета* ФГБОУ Российский государственный университет дружбы народов. В лабораторных условиях (температура 20–22 °С при влажности 50–60%) выделенные личинки из плодов хорошо развивались на тест-растениях томата и давали жизнеспособные последующие генерации, после чего биоматериалы уничтожались в соответствии с действующими нормативами Инструкций по работе с карантинными объектами.

При реализации оценочной математической модели термоадаптации *T. absoluta* на территории РФ использовалось программное обеспечение R с библиотекой Leaflet для построения картограмм, ранее неоднократно апробированное нами для решения схожих задач [Vasilyeva et al., 2016]. В качестве базового фактографического материала использовались данные ряда станций метеонаблюдений за 2017 г. по Московской области и Краснодарскому краю в открытом формате доступа, в том числе с использованием Интернет-ресурса [Погода..., 2020].

### **Некоторые факты распространения томатной минирующей моли в Старом Свете**

Первая же, при инвазии в Европу, вспышка численности *T. absoluta* на томатах на юге Испании в 2006 г. носила беспрецедентно масштабный характер и была признана катастрофической [Ижевский, 2011]. Этому способствовали сложившиеся климатические условия – оптимальные диапазоны температур, влажности и, в немалой степени, устойчивые сильные ветры в весенне-летний период. Среди значимых антропогенных факторов, способствовавших распространению вида, наряду с интенсивностью грузопотоков следует упомянуть использование многоразовой тары. [Перевертин, Заец, 2016].

Неотложные карантинно-организационные меры, в том числе и на межгосударственном уровне, не смогли предотвратить распространение *T. absoluta* по Европе и, особенно, Средиземноморью.

Стоит отметить, что даже применение в локализованных очагах распространения вре-

дителя пестицидов в дозах выше нормативных (карантинный мандат) не показало безусловной эффективности, что, отчасти, объясняется скрытой внутритканевой локализацией личинок, относительной устойчивостью яйцевой кутикулы, а также уникально адаптивной популяционной толерантностью к применяемым инсектицидам вследствие развития большого числа поколений (генераций) в течение вегетационного периода [Равашдех, 2014].

С 2011 г. поступают сообщения о регистрации томатной минирующей моли в Казахстане. К 2015 г. она отмечена в тепличных комбинатах Актюбинской, Кзыл-Ординской, Жамбылской, Южно-Казахстанской областей, а для последней с 2017 г. констатирована натурализация в открытом грунте [Айткулов, 2017].

В России первое сообщение о томатной минирующей моли поступило от специалистов ФГБУ Калининградская межобластная ветеринарная лаборатория в 2009 г. Изолированный Балтийский анклав не репрезентативен для остальной территории РФ, но уже в ноябре 2010 г. *T. absoluta* была выявлена в защищённых грунтах Краснодарского края, а в 2011 г. в Адыгее, Дагестане [Ижевский и др., 2011]. Вредитель внесён в Перечень карантинных объектов [Приказ..., 2014].

Эпизоды регистрации по РФ имеют довольно широкую географию. Например, в 2015 г. бабочка отмечена в Крыму (Сакский район), 16 июня 2016 г. в Камызякском р-не Астраханской обл., 3 июня 2016 г. управлением Россельхознадзора по Алтайскому краю предписано уничтожение партии томатов из Узбекистана в связи с обнаружением в ней *T. absoluta*.

С 2011 по 2014 г. томатная минирующая моль регистрировалась нами в импортной плодоовощной продукции и таре, посту-

пивших в оптовую и розничную торговлю г. Москвы [Равашдех, Заец, 2011; Перевертин, Заец, 2016]. Мониторинг распространения *вида* ведётся Всероссийским НИИ карантина растений. В определённой мере отражением не только распространения и натурализации, но и локальных проявлений вредоносности служит современный контент интернет-сайтов товаропроизводителей овощной продукции, где кроме популярных описаний южноамериканской томатной моли и обмена опытом присутствуют коммерческие предложения с доставкой по РФ средств борьбы, в частности, клейких ловушек.

### Термодетерминантные аспекты онтогенеза томатной минирующей моли

У *T. absoluta* цикл развития, лишен диапаузы (то есть непрерывен). Продолжительность стадий развития изменяется в зависимости от условий окружающей среды и, в частности, от температуры. В Иордании число полных генераций может составлять до 10 в год и меняться при переходе с севера на юг. В теплице моль активна на протяжении большей части года с весны до осени. В холодные месяцы года преобладают куколки. Продолжительность фаз яйца, личинки и куколки сокращается с повышением средней температуры, причём сокращение более выражено между пограничными поколениями в холодную погоду, а также в жаркое время года. Нижний температурный порог для стадии яйца, личинки и куколки составляет 9, 5 и 8 °С, соответственно (таблица).

Управление температурным режимом позволяет влиять на продолжительность существования личинок. Для этого в защищённых грунтах используют затеняющие покрытия от инсоляции или сдвигают начало вегетаци-

Таблица. Продолжительность развития стадий *T. absoluta* в зависимости от температуры

Температура, °С	Яйцо	Личинка	Куколка	Имаго	Всего дней
9	14.68±0.13	44.12±0.4	29.66±0.14	33.64±1	122
15	9.84±0.08	35.5±0.13	19.8±0.08	22.88±0.05	88
20	5.96±0.08	11.68±0.22	7.86±0.07	10.69±0.16	36
25	5.17±0.13	11.01±0.16	6.99±0.13	9.98±0.12	33
30	3.94±0.06	10.85±0.10	4.97±0.07	8.86±0.07	29

онного периода томатов на время меньших наружных температур [Равашдех, Заец, 2011].

Имаго *T. absoluta* начинают активный лёт для спаривания за 3–4 ч до восхода солнца. Обычно в условиях Иордании развивается 10 поколений в год и это число меняется при переходе с севера на юг. Самки откладывают до 260 яиц. Яйца откладываются в надземной части растения (листья, стебли, плоды), по одному или беспорядочно по 2–5. Для яйцекладки самки предпочитают верхние ярусы растений, зелёные незрелые плоды, а также чашечки цветков.

Наибольшее количество жизнеспособных яиц бабочка откладывает при температуре окружающей среды +30 °С (до 92%) по сравнению с минимальным их числом при +20 °С (до 56%). Вылупившиеся личинки некоторое время (30–40 мин) «блуждают», находясь на поверхности растений. Несколько отдаляясь от места своего появления (особенно, если яйца находились в группах), они через 5–40 мин начинают питаться паренхимой листьев или плодов. Открытое положение вредящей стадии в этот период, очевидно, обеспечивает большую эффективность применяемым защитным мероприятиям (химические обработки, опрыскивания биопрепаратами и др.). При высокой плотности заселения разные выгрызенные участки соединяются вместе. В этом случае, если поверхность листьев недостаточна для всех личинок, они оставляют первоначальные места и отправляются на поиски других частей растения для завершения развития.

Продолжительность личиночной стадии увеличивается на несколько дней для тех особей, которые неоднократно перемещались в поисках пищи, по сравнению с находившимися на одном месте на всём протяжении развития данной стадии.

Таким образом, температурный фактор и, в меньшей степени, состояние кормового растения, играют ведущую роль, определяя продолжительность развития личиночной стадии.

Личинки после внутритканевого периода питания выходят наружу для окукливания. От начала выхода до непосредственно окукливания проходит до 2 дней. Именно в это время вредитель второй раз в течение этапа развития личиночной стадии доступен для обработок

контактными (химическими, биологическими) препаратами.

Закончив развитие, большинство личинок падают на землю и образуют шелковистые коконы (7–9 мм длиной), к которым могут приклеиваться частицы земли. Часть личинок находят подходящее место для окукливания на растениях, как правило, на сухих листьях или на стеблях. В этом случае личинка прядёт шёлковое покрытие над собой. Таким образом, личинки не остаются в выгрызаемых «минах» в паренхиме листовых пластинок для окукливания [Равашдех, 2014].

### Модель оценки минимального числа генераций *Tuta absoluta* для двух контрастных регионов РФ

Нами построена прогностическая модель для оценки последствий натурализации томатной минирующей моли в регионах РФ с расчётом такого важнейшего показателя, как минимальное число полных генераций вредителя.

Подобные подходы моделирования детерминирующего эффекта температуры для описания популяционной динамики организмов в агробиоценозах использовались нами ранее [Vasilyeva et al., 2016].

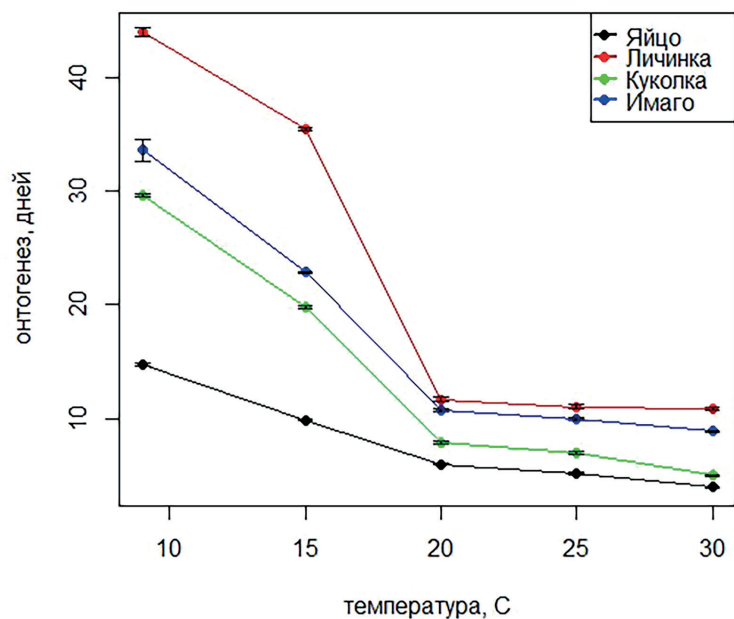
Выбор в качестве объектов моделирования таких регионов РФ, как Московская область (риск летней инвазии моли из г. Москвы) и Краснодарский край объясняется контрастностью климатических условий для вегетации томатов открытого грунта, а также подтверждёнными фактами регистрации рассматриваемого вида (что, конечно, не означает факта широкой натурализации).

### Описание модели

Текущее состояние популяции характеризуется полной фазой развития  $\psi = N + \varphi$ , где целая часть  $\psi$  – число пройденных полных циклов, дробная  $\varphi$  – фаза последнего цикла.

Фаза последнего цикла определяет одну из стадий развития:

- $0 < \varphi < 0.25$  – яйцо,
- $0.25 < \varphi < 0.5$  – личинка,
- $0.5 < \varphi < 0.75$  – куколка,
- $0.75 < \varphi < 1$  – имаго,



**Рис. 1.** Кусочно-линейная аппроксимация зависимости онтогенеза *T. absoluta* от температуры по экспериментальным данным.

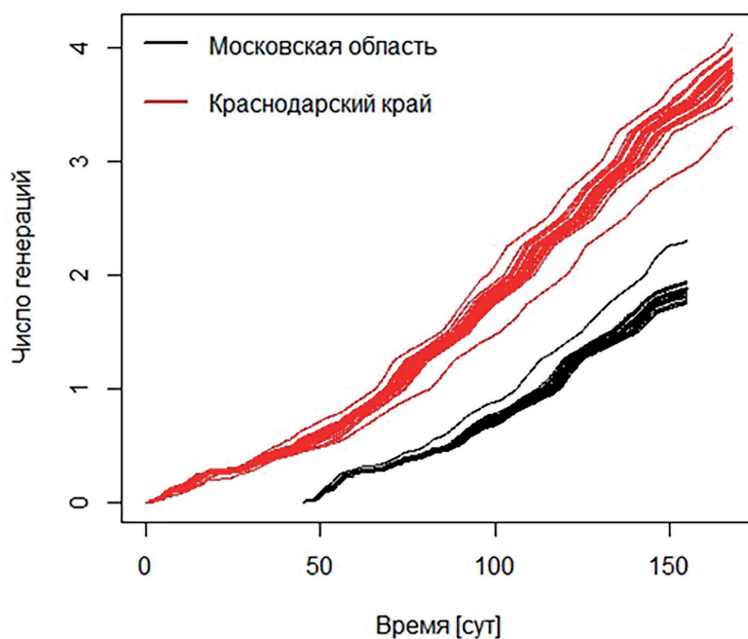
различающихся скоростью развития. Функция скорости развития  $s(\varphi, T(t))$  зависит от температуры в диапазоне  $T \in [9, 30]$  °C и текущей стадии развития. При  $T < 9$  °C скорость развития принимается равной нулю, начиная с  $T \geq 30$  °C скорость постоянна:

$$\begin{aligned} (d\psi)/dt &= s(\varphi, T(t)), \\ s|_{(T<9)} &= 0, \\ s|_{(T>30)} &= s|_{(T=30)} \end{aligned} \quad (1)$$

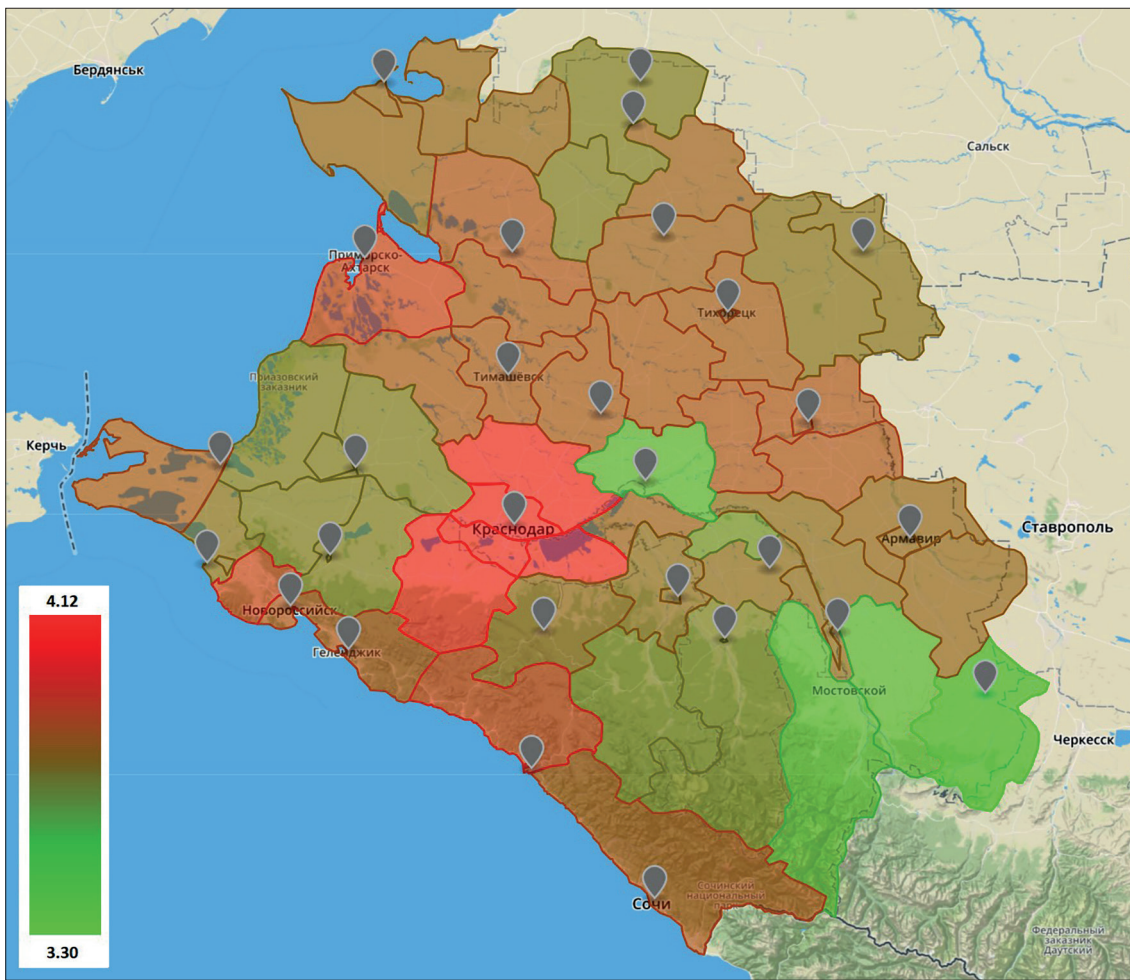
где  $s(\varphi, T) = 0.25/d$ ,  $d$  – длительность развития стадии  $\varphi$  при температуре.

В диапазоне  $T \in [9, 30]$  °C функция  $s$  определяется линейной интерполяцией экспериментальных данных (рис. 1).

Система уравнений (1) решается для полного цикла развития с использованием температурных данных районных метеостанций в течение вегетационного периода 2017 г. для



**Рис. 2.** Модель динамики развития *T. absoluta* в течение вегетационного сезона 2017 г. для Московской области (15.05 – 01.09) и Краснодарского края (01.04 – 15.09).



**Рис. 3.** Картограмма оценочного прогноза минимального числа генераций *T. absoluta* для Краснодарского края. Наибольший риск инвазии (красный фон) на плантациях томатов открытого грунта отмечен для административных единиц, располагающихся непосредственно вокруг г. Краснодара. (Серыми значками показаны районные метеостанции.)

Московской области (15.05 – 01.09) и Краснодарского края (01.04 – 15.09). Полученное число циклов для двух регионов (рис. 2) используется для построения картограмм (рис. 3 и 4). На последних учтена внутрирегиональная дифференциация климатических условий на основе локализации районных метеостанций, данные которых использовались в условно-верификационном (карантинный объект) представлении результатов моделирования.

Как видно из картограмм, наилучшие условия натурализации (красный фон) для Московской области отмечаются для Коломенского и Каширского районов, а по Краснодарскому краю – для административных единиц, непосредственно примыкающих к г. Краснодару.

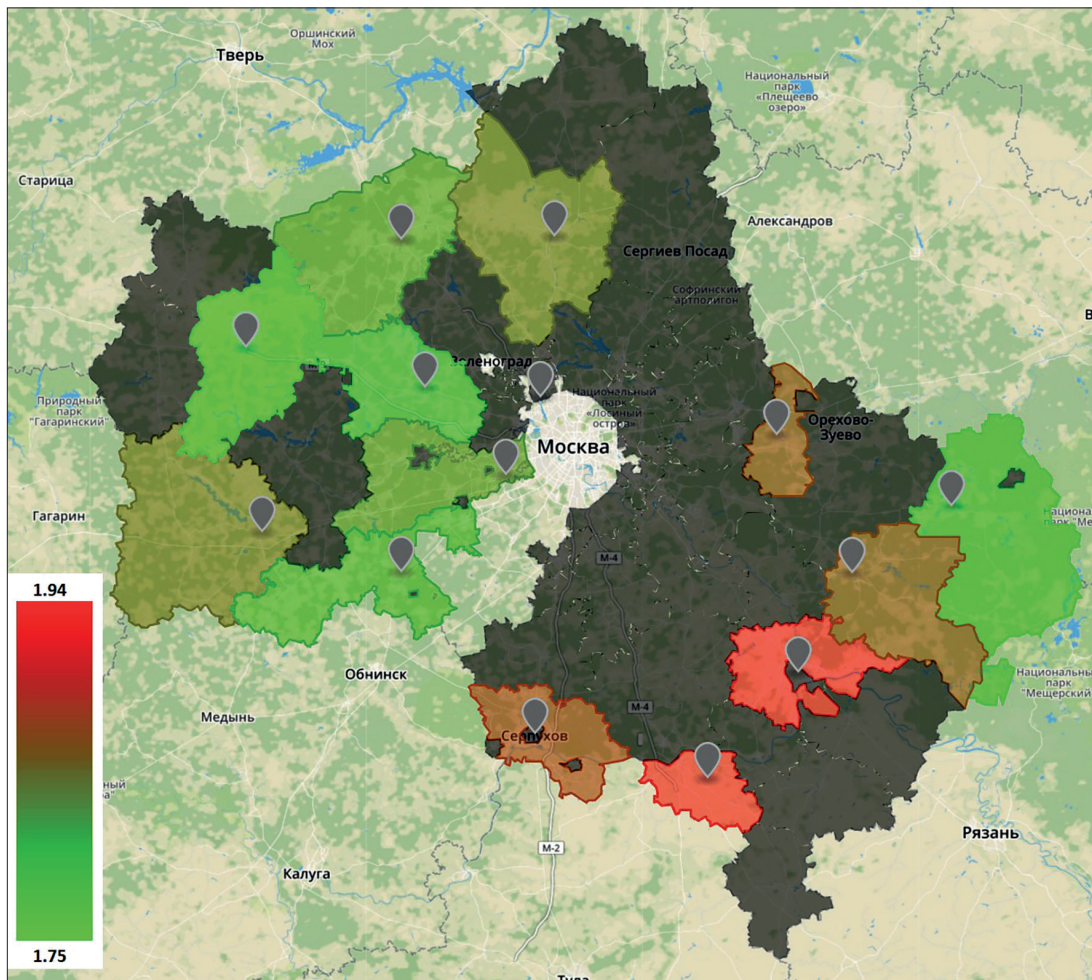
В целом, оценочное моделирование потенциала натурализации показывает возможность

развития томатной минирующей моли на открытых грунтах, по меньшей мере, в двух генерациях для Московской области (учитывая «полуактивные защищённые грунты», не имеющие отопления – плёночные и застеклённые парники) и, по меньшей мере, в четырёх генерациях для Краснодарского края.

### Выводы

1. Проведённый обзор распространения межконтинентальной биоинвазии южноамериканской томатной минирующей моли по Евразии показывает безусловную опасность данного насекомого для овощеводства РФ.

2. На основе экспериментальных данных построена математическая модель онтогенеза *T. absoluta* в зависимости от температуры. Применение модели для оценочных прогнозов



**Рис. 4.** Картограмма прогноза минимального числа генераций *T. absoluta* для отдельных районов Московской области. По результатам оценочного моделирования, в зоне наибольшего риска натурализации вида (красный фон) – Коломенский и Каширский административные районы. (Серыми значками показаны районные метеостанции.)

термоадаптации вредителя с использованием данных метеостанций для двух климатически контрастных регионов РФ показало возможность развития томатной моли в Московской области минимально в двух генерациях, в Краснодарском крае – минимально в четырёх. Наибольший риск натурализации вида отмечен для Коломенского и Каширского районов Московской области, а также территорий вокруг г. Краснодара.

#### Финансирование работы

Анализ данных по распространению вида и подготовка рукописи выполнены при финансовой поддержке фонда NordForsk проекта сотрудничества Российской Федерации и Северных стран «A multidisciplinary approach to anticipate critical regime shifts in ecosystems» (грант № 81513).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Соблюдение этических стандартов

Статья не содержит никаких исследований с участием животных в экспериментах, выполненных кем-либо из авторов.

#### Литература

- Айткулов А.К. и др. Анализ возможности акклиматизации южноамериканской томатной моли (*Tuta absoluta*) на территории республики Казахстан // «Сейфуллинские чтения – 13». Астана, 2017. Т. 1. Ч. 1. С. 61–64.
- Ижевский С.С., Ахатов А.К., Синёв С.Ю. Томатная минирующая моль выявлена уже в России // Защита и карантин растений. 2011. №3. С. 40–44.

- Равашдех Ш.Х., Заец В.Г. Томатная минирующая моль – опасный карантинный вредитель томата // Защита и карантин растений. 2011. № 12. С. 35–37
- Равашдех Ш.Х. Биология, вредоносность и совершенствование мер борьбы против томатной моли – *Tuta absoluta* (Meurigis) – в условиях Иордании: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: РГАУ-МСХА, 2014. 24 с.
- Перевертин К.А., Заец В.Г. Опаснейший карантинный вредитель // Картофель и овощи. 2016. № 1. С. 18–21.
- Погода в 243 странах мира (Электронный ресурс) // (<https://rp5.ru>). Проверено 03.02.2020.
- Приказ Минсельхоза РФ № 501 от 15.12. 2014 г. (Электронный документ) // (<https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minselhoza-Rossii-ot-15.12.2014-N-501/>). Проверено 03.02.2020.
- Crosby A.W. Reassessing 1492 // American Quarterly. 1989. Vol. 41(4). P. 661–669.
- Vasilyeva N.A., Ingtem J.G., Silaev D.A. Nonlinear dynamical model of microorganism growth in soil // Computational Mathematics and Modeling. 2016. 27 (2). 172–180.

## THE ROLE OF THERMAL ADAPTATION IN THE DISTRIBUTION OF THE TOMATO PEST *TUTA ABSOLUTA*

© 2020 Perevertin K.A.<sup>a, \*</sup>, Rawashdah Sh.<sup>b, \*\*</sup>, Zaetc V.G.<sup>c, \*\*\*</sup>, Kozlov D.N.<sup>d, \*\*\*\*</sup>, Vasilyeva N.A.<sup>d</sup>, Vasiliev T.A.<sup>d</sup>

<sup>a</sup> A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Moscow, 119071, Russia;

<sup>b</sup> National Center for Agricultural Research and Extension of Kingdom Jordan; Amman, 11621, Jordan;

<sup>c</sup> The Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198, Russia;

<sup>d</sup> Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017, Russia;

e-mail: \*[perevertink@mail.ru](mailto:perevertink@mail.ru), \*\*[rwashdah@yahoo.com](mailto:rwashdah@yahoo.com), \*\*\*[zaets05@mail.ru](mailto:zaets05@mail.ru), \*\*\*\*[kozlov\\_dn@esoil.ru](mailto:kozlov_dn@esoil.ru)

The relatively recent (2006) transatlantic introduction of the *Tuta absoluta* tomato moth from South America into the Old World is considered.

Based on the use of the thermal and adaptive mathematical model of ontogenesis of *T. absoluta*, it was made a conclusion about the threat of this pest species not only for sheltered soils, but also for plantations of open soils (a possibility of development of at least two generations for the Moscow Oblast and at least four ones for the Krasnodar Krai).

**Key words:** *Tuta absoluta*, ontogenesis, estimative mathematical model, biological contamination of agro-landscapes.