

Терагерцовое излучение улучшает признаки приспособленности у *Drosophila melanogaster*

Н. Я. ВАЙСМАН¹, В. И. ФЕДОРОВ², Е. Ф. НЕМОВА²

¹ Институт цитологии и генетики СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 10
E-mail: weisman@bionet.nsc.ru

² Институт лазерной физики СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13/3
E-mail: vif41@mail.ru

Статья поступила 23.04.2014

Принята к печати 07.05.2014

АННОТАЦИЯ

Актуальность изучения влияния неионизирующего терагерцового облучения (0,1–10 ТГц) на живые организмы определяется развитием в последние годы новых современных технологий с использованием этого излучения. В задачу нашего исследования входило выявление эффектов терагерцового облучения в последовательных поколениях дрозофил, родителей и их потомков F1. Эффекты терагерцового облучения на выживаемость и продолжительность жизни дрозофил линии Oregon R оказались разнонаправленными: в ранние периоды жизни – негативными или нейтральными, в поздние периоды – позитивными. У облученных самок выживаемость значительно увеличивалась во второй половине жизни имаго. Самцы оставались малочувствительными к облучению. Не обнаружено принципиальной разницы по показателям динамики созревания и общей численности между потомствами облученных и необлученных самок. Результаты практически не зависели от пола и стадии зрелости облученных яйцеклеток.

Ключевые слова: биологические эффекты терагерцового излучения, дрозофила, продолжительность жизни, выживаемость, половой диморфизм, яйцеклетка.

В современной фундаментальной науке возрос интерес к исследованиям, направленным на изучение взаимодействия неионизирующего терагерцового излучения (0,1–10 ТГц) с живой материей, в связи с возможной биологической опасностью развивающихся в последние годы технологий на его основе. В ряде работ получены данные о разнонаправленных воздействиях терагерцового

излучения на биологические системы разного уровня организации. Данные экспериментов определяются не только характеристиками источника и дозой облучения, но и свойствами биологических объектов: изолированных биологических макромолекул, бактерий, клеточных культур, целых организмов [Киричук и др., 2008; Wilmink, Grundt, 2011].

Показано, что облучение вызывает конформационные переходы в молекулах ДНК и белков. В опытах на свежесобранных эритроцитах обнаружено, что излучение снижает осмотическую устойчивость клеточной мембраны и увеличивает спонтанный выход гемоглобина. После облучения изолированных нейронов надглоточного ганглия прудовика, культур разных линий клеток человека обнаружено изменение структуры клеточной мембраны [Залюбовская, 1970; Федоров, 2011].

Излучение влияет на стабильность и пролиферативную активность лимфоцитов человека в культуре клеток, вызывает разнонаправленные изменения экспрессии генов в культуре клеток у бактерий и многоклеточных животных и репрограммирует дифференцировку стволовых клеток млекопитающих. Изменение экспрессии может наблюдаться в нескольких последующих поколениях после воздействия [Bock et al., 2010; Wilmlink et al., 2010; Федоров, 2011; Alexandrov et al., 2013; Demidova et al., 2013]. Высокоинтенсивное излучение может индуцировать клеточную гибель в культуре, стерильность и рецессивные летальные мутации в первом поколении дрозофил. В последующих потомствах облученных животных расширяется спектр мутационных изменений. Излучение низкой интенсивности производит позитивное воздействие и вызывает увеличение плодовитости дрозофил, инициирует уменьшение числа соматических мутаций на крыльях взрослых мух, вызванных гамма-облучением в личиночном периоде, усиливает репарацию в области ожогов у человека путем ускорения эпителизации и понижения микробного осеменения [Залюбовская, 1970; Федоров и др., 2001; Wilmlink, Grundt, 2011]. Интересно, что терагерцовое облучение воздействует на поведенческие реакции у самцов мышей, вызывая изменение двигательной активности и повышенную тревожность [Бондарь и др., 2008].

В задачу нашего исследования входило выявление эффектов терагерцового облучения в последовательных поколениях дрозофил, родителей и их потомков F1. Анализировали изменения важных адаптивных признаков, выживаемости и продолжительности жизни (ПЖ) у самцов и самок модельного объекта дрозофилы. Исследовали влияние

излучения на численность имаго, соотношение полов и особенности динамики развития потомства F1 от скрещивания облученных самок и самцов исходной линии дрозофил. Чувствительность яйцеклеток, находящихся на разных этапах развития, к различным внешним воздействиям неодинакова [Вайсман, Голубовский, 2008]. В связи с этим в настоящем исследовании оценивали данные у потомств F1, происшедших из зрелых или незрелых на момент облучения яйцеклеток самок дрозофил.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В экспериментах использовали дрозофил классической нормальной инбредной линии Oregon R *Drosophila melanogaster* из фонда лаборатории генетики популяций Института цитологии и генетики СО РАН. Для проведения опыта размножали линию при нормальной температуре 25 °С. Затем под бинокулярной лупой в опыт отбирали виргинных самок и самцов сразу после вылета имаго в течение суток. Во время отбора их наркотизировали эфиром. Первоначально дрозофил рассаживали в одинаковые сосуды, содержащие стандартную питательную среду, самок содержали отдельно от самцов.

Затем мух 2–3-дневного возраста каждого пола помещали по 20–30 особей в ограниченное пространство контейнеров (стандартные пластиковые пробирки Эппендорф высотой 50 мм и диаметром 5,5 мм) без корма. Отверстия пробирок закрывали пленкой из парафилма, в которой проделывали иголкой отверстия для поступления воздуха. В проверочном эксперименте установлено, что в натянутом состоянии пленка поглощает не более 1 % излучения. Половину пробирок с мухами облучали последовательно по одной в течение каждых 30 мин. Суммарное время пребывания мух в пробирках Эппендорф составляло около 2,5–3 ч.

Изучение динамики выживаемости и ПЖ. Для этого эксперимента в контейнеры всего заключили 480 мух, из них 240 подвергли терагерцовому облучению. Анализ ПЖ проводили в стандартных условиях, помещая облученных и необлученных (контрольных) дрозофил в сосуды со свежим кормом, в тер-

мостаты с постоянной температурой 25 °С (по 30 особей в отдельный сосуд). Каждые трое суток мух пересаживали на свежий корм и вели регистрацию смертности вплоть до завершения цикла жизни у всех мух в варианте опыта. Необлученных мух из контейнеров рассматривали как внутренний контроль (контроль 1). Внешним контролем служили интактные дрозофилы, содержащиеся во время опыта в обычных условиях ведения линии на стандартном корме (контроль 2).

Изучение особенностей динамики развития потомства F1. Облученных и необлученных самок помещали в стандартные лабораторные условия на свежий корм при температуре 25 °С (по 20 особей в отдельный стакан), и сразу же подсаживали самцов из группы внешнего контроля. Через каждые два дня родительских мух пересаживали в другие стаканы для выявления эффектов излучения на зрелые и незрелые на момент облучения яйцеклетки. От последовательных двухсуточных кладок яиц получали потомства. Известно, что оогенез у самок дрозофилы происходит непрерывно, в силу чего в каждый момент времени яичники дрозофилы содержат яйцеклетки разной степени зрелости. Кладки от самок в первые два дня после облучения соответствуют зрелым на момент облучения яйцеклеткам. Потомство, полученное из яиц, отложенных на 9–10 дни после облучения яйцеклеток, поскольку один цикл оогенеза, начиная со стадии половых стволовых клеток, занимает не более 10 дней [Horne-Badovinac, Bilder, 2005; Огиенко и др., 2007]. Начиная с первого дня вылета имаго, в потомствах F1 всех подопытных и контрольных групп каждый день регистрировали численность вылетевших мух, их пол и оценивали динамику вылета имаго до последнего дня вылета.

Источник терагерцового излучения. Использовали систему, созданную в Институте автоматики и электрометрии СО РАН. Система генерирует широкополосное импульсное терагерцовое излучение в диапазоне 0,1 – 2,2 ТГц с длительностью импульса 1 пс, мощностью в импульсе 8,5 мВт. Частота повторения импульсов 76 МГц. Излучение модулируется с частотой 10 кГц. Подробное описа-

ние системы дано в работе Анцыгина с соавт. [2010]. Диаметр пробирки Эппендорф соответствует диаметру терагерцового луча (5 мм).

Статистические методы. Специфические эффекты влияния терагерцового излучения на изучаемые признаки оценивали, сравнивая данные опытных групп и внутреннего и внешнего контроля. Для определения достоверности различий между кривыми выживаемости в выборках дрозофил применяли логранговый тест [Bland, Altman, 2004]. Соответствие экспериментальных расщеплений по признаку пола теоретически ожидаемым оценивали с помощью критерия χ^2 [Рокицкий, 1973]. Для определения достоверности различий между средними значениями продолжительности жизни применяли критерий Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что содержание дрозофил в течение нескольких часов на обедненной питательной среде [Раушенбах и др., 2004] или при повышенной плотности в ограниченном пространстве [Моссэ и др., 2006] вызывает неспецифическую стрессовую реакцию. В данном исследовании мухи, помещенные в пробирки Эппендорф, подвергались комбинации стрессорных факторов: ограничение пространства, скученность, лишение пищи. В связи с этим результаты терагерцового облучения рассматриваются на фоне такого комбинированного стресса.

Динамика смертности и ПЖ. Средняя продолжительность жизни самок и самцов Ogegon R во внешнем контроле в настоящем опыте оказалась несколько ниже, чем мы наблюдали ранее, и составила $34,3 \pm 1,36$ и $32,5 \pm 1,2$ дней соответственно. Характерные для линии половые различия показателей ПЖ и профили кривых выживаемости с резким повышением смертности на поздних отрезках жизни остались неизменными. На рис. 1 представлены кривые убывания численности контрольных самок и самцов в течение всего наблюдения (см. рис. 1, а), которые в целом отличаются достоверно ($\chi^2 = 13,79$; $p < 0,05$).

Выживаемость самок, перенесших кратковременный комбинированный стресс (огра-

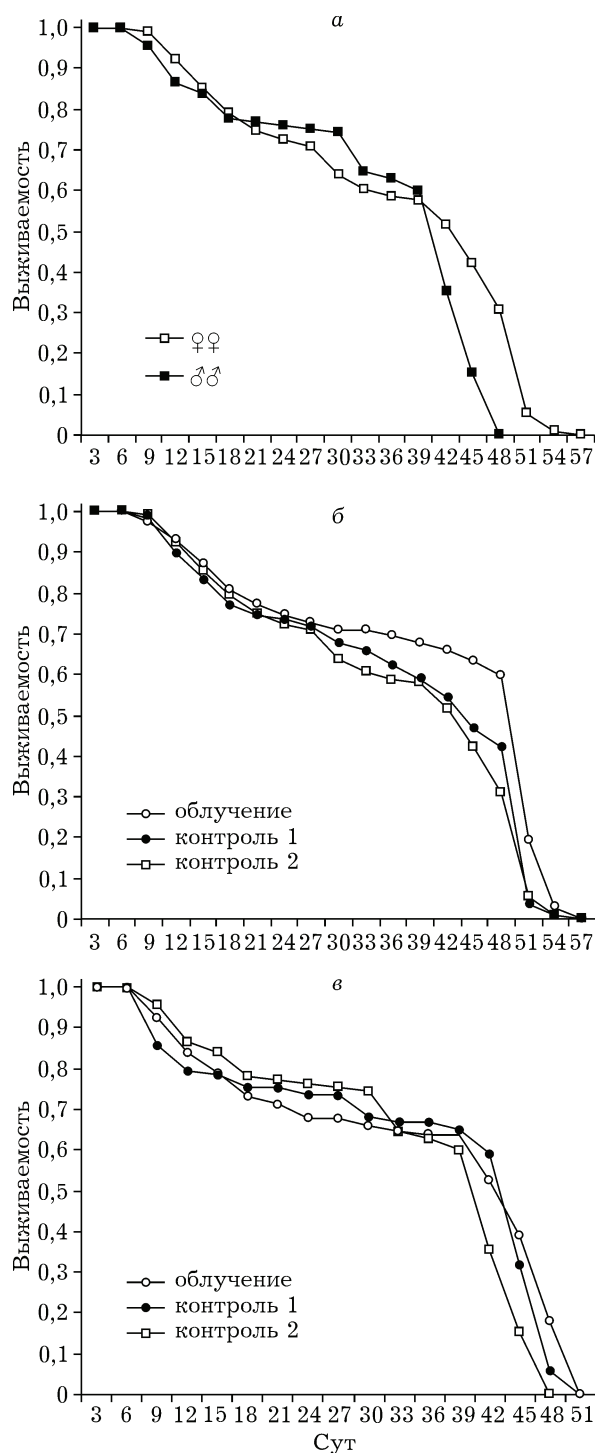


Рис. 1. Выживаемость имаго линии Oregon R *Drosophila melanogaster* при 25 °C в контроле 2 (а), у самок (б) и самцов (в)

ничение пространства, отсутствие питательной среды), на протяжении всего опыта не изменилась по сравнению с внешним контролем. Между кривыми этих групп самок достоверных различий не обнаружено ($\chi^2 =$

$= 0,57; p < 0,05$). Выживаемость самок опытной облученной группы в первой половине жизни тоже не отличалась от внешнего контроля, но во второй половине обнаружены ее позитивные изменения. “Точка крутизны” кривой выживаемости облученных самок смещена по сравнению с внешним контролем на 9 дней позже. Кривые выживаемости в целом для облученных самок и внешнего контроля отличаются достоверно ($\chi^2 = 9,98; p < 0,05$). Облучение самок достоверно повысило выживаемость предварительно подвергнутых стрессу мух, кривые выживаемости для них отличаются достоверно ($\chi^2 = 5,98; p < 0,05$) (см. рис. 1, б).

Последствия перенесенного стресса у самцов на протяжении большей части жизни были негативными, и смертность превышала контроль. В последней трети жизни у них обнаружено значительное превышение выживаемости по сравнению с внешним контролем. В целом между кривыми выживаемости самцов этой группы и внешнего контроля обнаружена достоверная разница ($\chi^2 = 5,97; p < 0,05$) (см. рис. 1, в). Терагерцовое излучение, последовавшее за кратковременным стрессом, практически не повлияло на выживаемость самцов. Кривые выживаемости животных двух групп, внутреннего контроля и облученных, не различались между собой ($\chi^2 = 1,21; p < 0,05$). Как и у стрессированных мух, профиль динамики смертности облученных животных достоверно отличался от внешнего контроля ($\chi^2 = 9,39; p < 0,05$). Значения средней продолжительности жизни самцов и самок во всех исследованных группах существенно не отличались друг от друга.

Особенности динамики развития F1. Потомства зрелых яйцеклеток. Линия Oregon R *Drosophila melanogaster* стала объектом серии наших исследований. При нормальной температуре 25 °C и на стандартной питательной среде цикл развития потомков F1 до стадии имаго в среднем составляет около 10 дней. В стандартных условиях в разных вариантах опытов в контрольных и подопытных группах протяженность периодов вылета и динамика развития животных может несколько варьировать. Естественное развитие дрозофил и временные характеристики других физиологических и онтогенетических

процессов зависят от сложного динамического комплекса факторов окружающей среды. Многие факторы среды не могут быть учтены во время выполнения эксперимента. Для выяснения их природы требуются специальные исследования.

В потомстве $F1_{\text{БК}}$, когда мать и отец представляли группу внешнего контроля, развившегося из яйцеклеток, созревших на момент облучения подопытных самок, динамика созревания до стадии имаго у самцов и самок различалась ($\chi^2 = 7,06$; $p < 0,05$). Динамика вылета имаго самок и самцов в потомстве $F1_{\text{СК}}$ от скрещивания стрессированных необлученных родительских самок с интактными самцами (группа внешнего контроля) существенно изменилась по сравнению с потомством $F1_{\text{БК}}$ ($\chi^2 = 16,72$ и $\chi^2 = 6,7$ соответственно, $p < 0,05$) и была неодинаковой у самцов и самок ($\chi^2 = 15,02$; $p < 0,05$). Суммарное число вылетевших самцов и самок в $F1_{\text{БК}}$ и $F1_{\text{СК}}$ составило 714, 710 и 742, 727 особей соответственно. Кратковременный стресс практически не отразился на численности имаго потомства $F1_{\text{СК}}$ и соотношении полов.

В потомстве $F1_{\text{ТО}}$ от самок, подвергнутых терагерцовому облучению, и интактных самцов обнаружены достоверные различия по динамике вылета между полами ($\chi^2 = 13,29$; $p < 0,05$). Динамика вылета самок и самцов в этом потомстве существенно отличалась от таковой в группе $F1_{\text{БК}}$ ($\chi^2 = 10,47$ и $\chi^2 = 3,9$ соответственно, $p < 0,05$). Тогда как видимые различия между динамикой вылета самок и самцов в потомствах от облученных и стрессированных матерей при парном статистическом сравнении оказались недостоверными ($\chi^2 = 1,21$ и $\chi^2 = 0,31$ соответственно, $p > 0,05$). Общее число потомков $F1_{\text{ТО}}$ составило 683 самца и 724 самки. Статистические оценки показали, что во всех потомствах $F1_{\text{БК}}$, $F1_{\text{СК}}$ и $F1_{\text{ТО}}$ отклонения от теоретически ожидаемого соотношения полов 1 : 1 недостоверны ($\chi^2 = 0,01$; $\chi^2 = 0,15$ и $\chi^2 = 1,19$ соответственно, $p > 0,05$) (рис. 2, а).

Потомства незрелых яйцеклеток. Динамика созревания самцов и самок до стадии имаго в потомстве $F1_{\text{БК}}$ от интактных самок и самцов, происшедшего из яйцеклеток, незрелых на момент облучения опытных самок, отличалась несущественно ($\chi^2 = 0,02$, $p > 0,05$). В группе $F1_{\text{СК}}$ (потомство от скрещивания

стрессированных самок и интактных самцов) динамика вылета самцов и самок значительно различалась ($\chi^2 = 9,24$; $p < 0,05$) и существенно отличалась от потомства $F1_{\text{БК}}$ (самки $\chi^2 = 6,66$; самцы $\chi^2 = 23,92$). Численность самцов и самок в $F1_{\text{БК}}$ и $F1_{\text{СК}}$ составила 711, 767 и 784, 834 особей. Расщепление по полу в обоих случаях приближалось к теоретически ожидаемому расщеплению 1 : 1 ($\chi^2 = 2,12$; $\chi^2 = 1,55$ соответственно; $p > 0,05$).

В потомстве $F1_{\text{ТО}}$ от самок, подвергнутых терагерцовому облучению, развившемся из яиц, отложенных на 9–10 дни после воздействия (что соответствует яйцеклеткам, незрелым на момент облучения), динамика созревания самок и самцов практически совпала с динамикой, характерной для животных в группе $F1_{\text{СК}}$ ($\chi^2 = 0,92$, $\chi^2 = 0,12$ соответственно; $p < 0,05$), но совершенно не соответствовала данным для $F1_{\text{БК}}$ ($\chi^2 = 11,34$; $\chi^2 = 20,94$ соответственно; $p < 0,05$). Общая численность вылетевших самцов оказалась несколько меньше, чем самок (747 и 799 особей соответственно), что не привело к существенному отклонению от теоретически ожидаемого расщепления по полу 1 : 1 ($\chi^2 = 1,75$; $p < 0,05$) (см. рис. 2, б).

Модельные опыты на дрозофиле позволяют проследить динамику развития, старения и смертности в популяциях особей равного возраста, оценить влияние на эти признаки пола и внешних условий. Сопоставление модельных данных с таковыми у человека позволяет прогнозировать демографические показатели и их зависимость от воздействий условий среды.

Эффекты терагерцового облучения на выживаемость и ПЖ на фоне стресса в нашем опыте с дрозофилами линии Oregon R оказались разнонаправленными в зависимости от возраста животных. Воздействие на выживаемость в ранние периоды жизни дрозофил было негативным или нейтральным, в поздние периоды – позитивным. Феномен двойственности проявления жизненных структур и процессов, “антагонистическая плейотропия”, широко распространен в природе. Возрастная антагонистическая плейотропия свойственна и генам ПЖ у дрозофилы [Nuzhdin et al., 1997]. В реакции дрозофил на терагерцовое излучение проявились половые различия. Самцы оказались малочувствительными

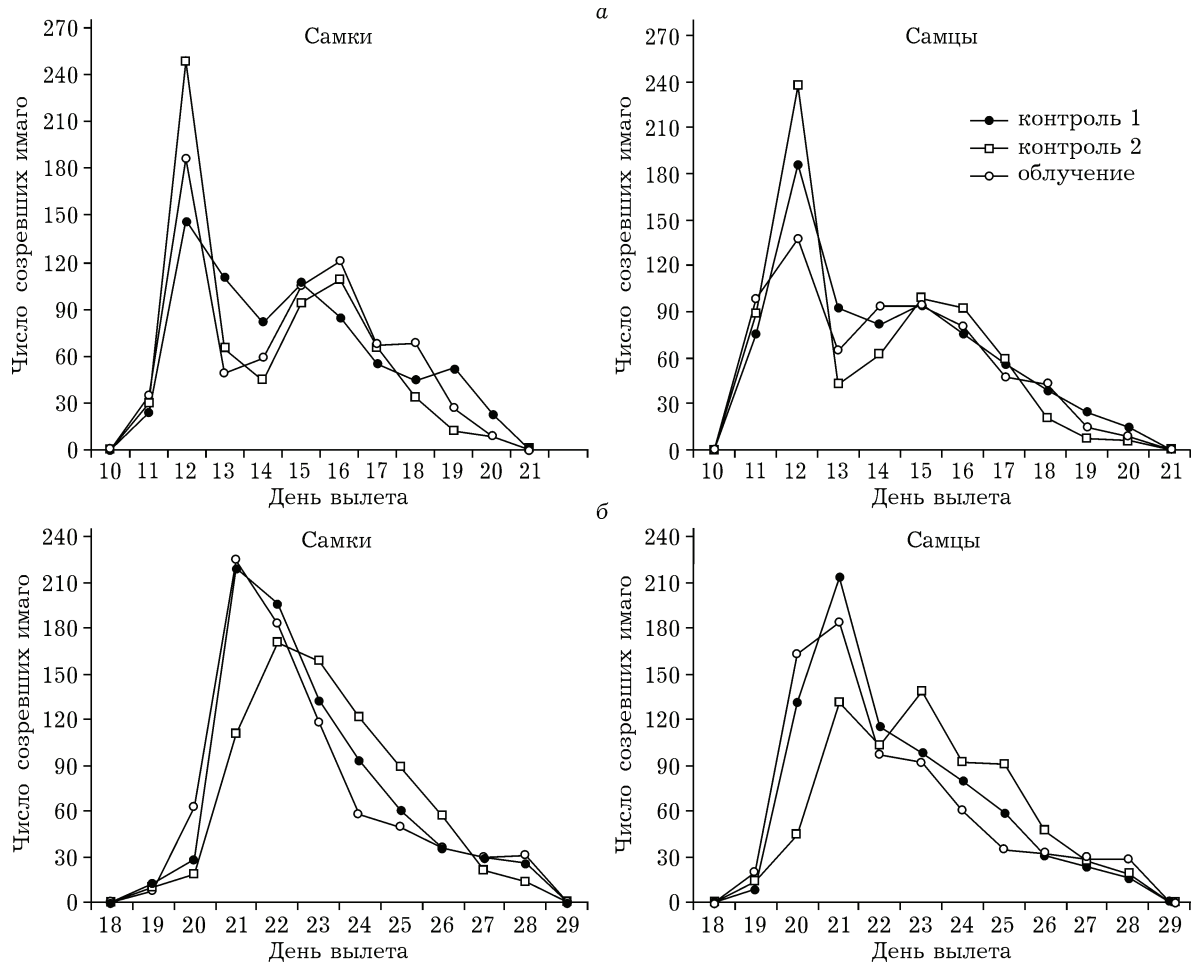


Рис. 2. Динамика созревания самцов и самок в потомствах контрольных и подопытных мух линии Oregon R. Зрелые (а) и незрелые (б) на момент облучения яйцеклетки

ми к облучению. У облученных самок выживаемость значительно увеличивалась во второй половине жизни имаго. Облучение дрозофил существенно не отразилось на величинах средней и максимальной ПЖ по сравнению с контролем, но увеличило разрыв между значениями средней ПЖ самцов и самок в этой группе животных. Половая специфичность ответа на терагерцовое облучение обнаружена и в экспериментах с крысами, причем самки оказались более чувствительными к этому воздействию [Киричук и др., 2008].

Для выяснения отдаленных последствий терагерцового облучения самок дрозофил анализировали численность имаго, соотношение полов и особенности динамики развития в потомстве F1. Несмотря на то, что на отдельных временных отрезках наблюдались отличия, в целом не обнаружено принци-

альной разницы по показателям динамики созревания между потомствами облученных и необлученных стрессированных мух. Результаты практически не зависели от стадии зрелости облученных яйцеклеток. Везде общая численность особей, достигших стадии имаго, отличалась несущественно. Обнаружилась тенденция к снижению показателя общей численности самцов в потомстве облученных самок, соответствующем зрелым яйцеклеткам, по сравнению с внутренним контролем, хотя соотношение полов не отличалось от теоретически ожидаемого расщепления 1 : 1. Можно предположить, что зрелые яйцеклетки восприимчивы к воздействию терагерцового излучения. Характер отклика может определяться частотой и мощностью излучения, дозой воздействия и т. д. При других параметрах опыта с другими генетическими линиями дрозофил возможно

выявление других эффектов терагерцового излучения на потомство облученных самок.

Что касается конкретных механизмов влияния терагерцового излучения на живые объекты, то оно может быть связано с изменением функциональной активности клеток, изменением экспрессии генов. Результаты опытов Н. П. Залюбовской [1970] *in vitro* в линиях клеточных культур человека позволили автору предположить, что терагерцовое излучение непосредственно воздействует на функцию ДНК. Позднее получены экспериментальные данные о том, что терагерцовое излучение вызывает изменения на молекулярном уровне. Обнаружено, что оно может вызывать частичное или полное разрушение водородных связей между комплементарными цепями ДНК, существенно менять степень конденсации ДНК в хромосоме и приводить к изменению регуляции экспрессии генов и репликации ДНК [Alexandrov et al., 2010]. В ответ на облучение терагерцовым излучением культуры мезинхимальных стволовых клеток мыши экспрессия части генов супрессируется или активируется в результате прямой частичной активации или супрессии транскрипционных факторов [Bock et al., 2010]. Сходные данные по изменению экспрессии генов получены в клетках ряда линий человека [Wilmink et al., 2010].

Прямая связь между воздействием терагерцового излучения и изменением экспрессии генов *katG* и *copA* установлена в эксперименте с *E. coli*. Обнаружена стабильная индукция экспрессии репортерного гена *GFP* с промотором *katG* в течение длительного времени после терагерцового облучения. Изменение экспрессии сохранялось в течение восьми последующих поколений после облучения [Demidova et al., 2013]. Механизмы воздействия ТГЧ-излучения на выживаемость и ПЖ в нашем исследовании могут быть связаны с изменениями экспрессии генов и сигнальных путей, контролирующих эти признаки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффекты терагерцового облучения на выживаемость и ПЖ на фоне стресса в нашем опыте с дрозофилами линии Oregon R оказались разнонаправленными в зависимости от

возраста животных. Воздействие на выживаемость в ранние периоды жизни дрозофил было негативным или нейтральным, в поздние периоды – позитивным. В реакции дрозофил на терагерцовое излучение проявились половые различия. Самцы оказались малочувствительными к облучению. У облученных самок выживаемость значительно увеличилась во второй половине жизни имаго. Облучение дрозофил существенно не отразилось на величинах средней и максимальной ПЖ по сравнению с контролем, но увеличило разрыв между значениями средней ПЖ самцов и самок в этой группе животных. Существенных отдаленных последствий терагерцового облучения самок дрозофил в отношении общей численности имаго, соотношения полов и особенностей динамики развития в потомстве F1 не обнаружено. По показателям динамики созревания отличия наблюдались на отдельных временных отрезках, но в целом принципиальной разницы между потомствами облученных и необлученных мух не выявлено. Результаты практически не зависели от стадии зрелости облученных яйцеклеток.

ЛИТЕРАТУРА

- Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Малогабаритный терагерцовый спектрометр с использованием второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера // Автотметрия. 2010. Т. 46, № 3. С. 110.
- Бондарь Н. П., Коваленко И. Л., Августинович Д. Ф., Хамоян А. Г., Кудрявцева Н. Н. Влияние терагерцовых волн на поведение самцов мышей // Бюлл. exper. биол. мед. 2008. Т. 145, № 4. С. 378–383.
- Вайсман Н. Я., Голубовский М. Д. Стресс на стадии формирования яйцеклеток влияет на выживаемость и долголетие потомков: роль опухолевого супрессора *lgl* в модельных экспериментах на дрозофиле // Докл. АН. 2008. Т. 419, № 1. С. 130.
- Залюбовская Н. П. К оценке действия микроволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазона на различные биологические объекты: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Харьков, 1970. 15 с.
- Киричук В. Ф., Иванов А. Н., Антипова О. Н., Креницкий А. П., Майбородин А. В., Тупикин В. Д. Половые различия в изменении нарушенной функциональной активности тромбоцитов у белых крыс под влиянием электромагнитного излучения терагерцового диапазона на частотах оксида азота // Бюлл. exper. биол. мед. 2008. Т. 145, № 1. С. 81–84.
- Мосса И. Б., Анощенко И. П., Глушкова И. В., Аксютик Т. В., Камыш Н. А., Касинская С. И., Михайлова М. Е., Тиханович Н. И. Генетический мониторинг природ-

- ных популяций дрозофилы, обитающих в загрязненных радионуклидами районах Белоруссии // Радиационная биология. Радиоэкология. 2006. Т. 46, № 3. С. 287–295.
- Огиенко А. А., Федорова С. А., Баричева Э. М. Основные аспекты развития половой системы самок *Drosophila melanogaster* // Генетика. 2007. Т. 43, № 10. С. 1341–1357.
- Раушенбах И. Ю., Адоньева Н. В., Грунтенко Н. Е., Карпова Е. К., Фаддеева Н. В. Ювенильный гормон контролирует процесс откладки яиц и плодовитость *Drosophila virilis* при голоде // Онтогенез. 2004. Т. 35, № 5. С. 366.
- Рокицкий П. Ф. Биологическая статистика. Минск: Высшая шк., 1973. 319 с.
- Федоров В. И. Исследование биологических эффектов электромагнитного излучения субмиллиметровой части терагерцового диапазона // Биомед. радиоэлектроника. 2011. № 2. С. 17–27.
- Федоров В. И., Погодин А. С., Дубатолова Т. Д., Варламов А. В., Леонтьев К. В., Хамоян Г. В. Сравнительное исследование влияния электромагнитного излучения инфракрасного, субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов на индуцированные γ -облучением соматические мутации клеток крыльев *Drosophila melanogaster* // Биофизика. 2001. Т. 46, № 2. С. 298–302.
- Alexandrov B. S., Gelev V., Bishop A. R., Usheva A., Rasmussen K. O. DNA breathing dynamics in the presence of a terahertz field // Phys. Lett. A. 2010. Vol. 374, N 10. P. 1214.
- Alexandrov B. S., Phipps M. L., Alexandrov L. B., Booshehri L. G., Erat A., Zabolotny J., Mielke C. H., Chen H., Rodriguez G., Rasmussen K., Martinez J. S., Bishop A. R., Usheva A. Specificity and heterogeneity of terahertz radiation effect on gene expression in mouse mesenchymal stem cells // Sci. Rep. 2013. N 3. P. 1184.
- Bland J. M., Altman D. G. The logrank test // Br. Med. Journ. 2004. Vol. 328, N 7447. P. 1073.
- Bock J., Fukuyo Y., Kang S., Phipps M. L., Alexandrov L. B., Rasmussen K., Bishop A. R., Rosen E. D., Martinez J. S., Chen H. T., Rodriguez G., Alexandrov B. S., Usheva A. Mammalian stem cells reprogramming in response to terahertz radiation // PLoS One. 2010. Vol. 5, N 12. P. 15806.
- Demidova E. V., Goryachkovskaya T. N., Malup T. K., Bannikova S. V., Semenov A. I., Vinokurov N. A., Kolchanov N. A., Popik V. M., Peltek S. E. Studying the non-thermal effects of terahertz radiation on *E. coli*/pKatG-GTP biosensor cells // Bioelectromagnetics. 2013. Vol. 34, N 1. P. 15–21.
- Horne-Badovinac S., Bilder D. Mass transit: epithelial morphogenesis in the *Drosophila* egg chamber // Devel. dynamics. 2005. Vol. 232. P. 574–559.
- Nuzhdin S. V., Pasyukova E. G., Dilda CH. L., Zeng Z. B., Mackay T. F. C. Sex-specific quantitative trait loci affecting longevity in *Drosophila melanogaster* // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1997. Vol. 94. P. 9734–9739.
- Wilmink G. J., Grundt L. E. Current state of research on biological effects of terahertz radiation // J. Infrared Millimeter Terahertz Waive. 2011. Vol. 32, N 10. P. 1074–1122.
- Wilmink G. J., Ibe B. L., Roth C. L., Vincelette R. L., Rivest B. N., Horn C. B., Bernhard J., Ronerson D., Roach W. Determination of death thresholds and identification of terahertz (THz)-specific gene expression signatures // Optical Interactions with Tissues and Cells XXI. Proc. SPIE. 2010. Vol. 7562. P. 75620K–75620K-8.

Terahertz Radiation Improves Adaptation Characteristics in *Drosophila melanogaster*

N. Ya. WEISMAN¹, V. I. FEDOROV², E. F. NEMOVA²

¹ Institute of Cytology and Genetics SB RAS
630090, Novosibirsk, Lavrentyev ave., 10
E-mail: weisman@bionet.nsc.ru

² Institute of Laser Physics SB RAS
630090, Novosibirsk, Lavrentyev ave., 13/3
E-mail: vif41@mail.ru

The relevance of studying how non-ionizing terahertz radiation (0.1–10 THz) affects the living organisms is determined by the recent development of modern technologies that use such radiation. The aim of our study was to establish the impact of terahertz radiation on successive generations of fruit flies. The effect of terahertz radiation on the survival ability and lifespan of the Oregon-R strain of *Drosophila melanogaster* proved to be divergent: at early life stage they were negative and neutral, at late stages – positive. The radiation-exposed female flies showed increasing survival capability during the second half of the life of imago. Males showed low-sensitivity to radiation. There was not noted any significant difference in developing dynamics and total number of offspring between the female flies that were exposed and that were not exposed to radiation. The results of the study practically did not depend on the gender and maturity stage of the irradiated oocytes.

Key words: biological effects of terahertz radiation, *Drosophila*, lifespan, survival capability, sexual dimorphism, oocyte.