

УДК 629.786:595.12:591.169

## ЭКСПЕРИМЕНТ «РЕГЕНЕРАЦИЯ» НА ПЛАНАРИЯХ В ОРБИТАЛЬНОМ ПОЛЕТЕ НА МКС

Г.И. Горгиладзе

Докт. биол. наук, чл.-корр. РАН, проф. Г.И. Горгиладзе  
(ГНЦ РФ – ИМБП РАН)

В статье представлены результаты космического эксперимента (КЭ) «Регенерация» на пресноводном ресничном черве планария *Girardia tigrina* лабораторной расы, размножающемся бесполом путем – делением тела на две половины. За 10–12 ч перед началом КЭ планарии наркотизировали и расчленили поперек и продольно тела на отдельные фрагменты. 43 интактные планарии и 259 фрагментов размещали в инкубационные капсулы, заполненные пресной водой специального состава, и на пилотируемых космических кораблях «Союз» и транспортных грузовых кораблях «Прогресс» доставляли на МКС. Длительность экспозиции в орбитальном полете (ОП) составила 9, 10, 11, 12, 14, 23, 34, 35 и 47 суток. Результаты КЭ «Регенерация» показали сохранность у *Girardia tigrina* размножения бесполом путем и воссоздания из фрагментов целого организма. Оба эти процесса – размножение делением и восстановление из фрагментов путем достраивания утраченных частей тела – совершались таким же образом, как и при 1 г. Лocomоторная активность и пищедобывательная реакция планарий, «родившихся» и регенерировавших в невесомости, после возвращения на Землю были в пределах нормы. Таким образом, невесомость не явилась чуждой средой для такого существа как планария, у которой были сохранены два важнейших, присущие земным организмам, признака – размножение и регенерация.

**Ключевые слова:** планария, регенерация, невесомость, МКС

### “Regeneration” Experiment with Planarians during Orbital Flight on the ISS. G.I. Gorgiladze

The paper presents the results of the “Regeneration” Space Experiment (SE) with the limnetic turbellarian worms of the *Girardia tigrina* planarian of a laboratory race which reproduces asexually – by dividing the body into two halves. 10–12 hours before the start of the experiment, planarians were anesthetized and dissected transversely and longitudinally of the body into separate fragments. 43 intact planarians and 259 fragments were placed in incubation capsules filled with freshwater of a special composition, and delivered to the ISS on “Soyuz” manned spacecraft and “Progress” cargo vehicles. The exposure duration in orbital flight (OF) was 9, 10, 11, 12, 14, 23, 34, 35 and 47 days. The results of the “Regeneration” SE showed that during orbital flight, *Girardia tigrina* preserves both the asexual reproduction capacity and the capacity to regenerate a whole organism from its fragments. Both of these processes – reproduction by division and self-regeneration from fragments – occurred in the same way as at 1 g. The locomotor activity and food-procuring reaction of planarians that were “born”

and regenerated in weightlessness were within the normal range after returning to Earth. Thus, weightlessness was not an alien environment for such a creature as the planaria, which preserved two of the most important capacities inherent under terrestrial conditions – reproduction and regeneration.

**Keywords:** planaria, regeneration, weightlessness, ISS

Всего шесть десятилетий отделяют нас от момента появления человека в космическом пространстве и совершенно новой за все время существования человечества профессии «Космонавт». Животные первыми стали «осваивать» космос. Они были и остаются источником получения опережающей информации о возможных рисках для человека в космосе. 19 августа 1960 г. две собаки Белка и Стрелка провели 25 ч в ОП на корабле «Спутник-5» и благополучно вернулись на Землю. Это событие было воспринято как гарантия безопасности для полета человека в космос. Спустя восемь месяцев, 12 апреля 1961 г., Юрий Гагарин стал первым космонавтом, совершившим один оборот вокруг Земли на корабле «Восток-1». В настоящее время космическая биология приобрела собственное «лицо» со своей методологией и стратегиями исследования. Одна из первостепенных задач, стоящих перед ней: сохранится ли способность восстановления поврежденных органов и тканей в такой необычной и незнакомой среде, какой является космическое пространство для земных организмов? Увеличение длительности пилотируемых полетов и объема работ, усложнение операторских задач, несомненно, повышают риск несчастного случая и получения различного рода травм. По этой причине информация по регенерации поврежденных органов и тканей в космическом полете, добытая в модельных опытах на животных, окажется полезной в системе мер по медицинскому обеспечению полетов.

Планария, пожалуй, лучший модельный объект для изучения восстановительного морфогенеза. Этот низший червь содержит в себе идентичные с человеком гены. Размножаются планарии как половым, так и бесполом способом – делением поперек тела на две половины. Каждая из них спустя несколько суток регенерирует в полноценную особь. К передней половине прирастает недостающая задняя часть тела, к задней половине – передняя часть тела. При оперативном расчленении планарии на множество фрагментов восстановление недостающих, утраченных частей тела протекает аналогично ее естественному делению. Из каждого фрагмента регенерирует новая планария, которая спустя некоторое время дорастает до материнского организма [1, 2]. Умение планарии клонировать себя и возрождаться дано ей природой. До 30 % клеток ее организма представлены необластами. Необласты – недифференцированные эмбриональные стволовые клетки, склонные к размножению. На месте деления естественным путем либо оперативного вмешательства из размножившихся необластов формируется новое образование – регенерационная почка или бластема, которая постепенно принимает вид удаленной части тела [3–5]. Для планарии, в отличие

от регенерации у гастропод и амфибий, это довольно быстрый процесс, который занимает не более одной недели. Планария, обладающая столь выраженными способностями к восстановлению утраченных частей тела, не могла не появиться на орбите. Подготовка к такому эксперименту в ИМБП была начата в 2003 г. Объектом была избрана планария *Girardia tigrina* – лабораторная раса, размножающаяся исключительно бесполом путем. Первое «знакомство» *G. tigrina* с космосом состоялось в 2005 г. Перед полетом тело планарии было расчленено на три фрагмента: передний – головной, средний – туловищный и задний – хвостовой. После 10-суточного ОП на МКС в полетной капсуле обнаружили три планарии. Каждый фрагмент превратился в целую планарию. У переднего фрагмента появилось туловище и задняя часть тела, у среднего фрагмента – головной конец и задняя часть тела и у заднего фрагмента – головной конец с туловищем. После полета регенерировавшие планарии проявили нормальную двигательную и пищедобывательную активность. Итоги этого КЭ были доложены в 2006 г. на Пятом Международном аэрокосмическом конгрессе, посвященном 25-летию вывода в космос орбитальной станции «Мир», и на XIII конференции «Космическая биология и авиакосмическая медицина», посвященной 45-летию первого полета человека в космос. Первая экспресс-публикация появилась в академическом научном журнале «Доклады Академии наук» в 2008 г. [6–8]. В последующие 13 лет планария стала частой гостьей на МКС. За это время были проведены 12 КЭ длительностью от 9 до 47 сут, результаты которых представлены в настоящей работе.

Основание для проведения КЭ «Регенерация» – долгосрочная программа научно-прикладных исследований и экспериментов РКА и Роскосмоса на российском сегменте (РС) МКС.

### **Объект и методы исследования. Основные характеристики научной аппаратуры**

**Объект исследования.** Пресноводный ресничный плоский червь планария *Girardia tigrina* (Girard, 1850), синонимы: *Dugesia tigrina* (Girard, 1850), *Girardia jimi* (Martins, 1970). Систематика: род *Girardia*, семейство *Dugesidae*, подотряд *Continenticola*, отряд *Tricladida*, класс *Rhabditophora*, тип *Platyhelminthes*. Инвазивный вид из Северной Америки. В настоящей работе использовали *G. tigrina* бесполой лабораторной расы, выращенной в ФГБУН ИТЭБ РАН (г. Пущино) и размножающейся исключительно фрагментацией собственного тела путем поперечного деления на две половины. На уплощенном полупрозрачном теле серовато-бурого цвета имеются многочисленные пигментные пятна (отсюда видовое название *tigrina* – тигровая), на голове треугольной формы с тупым концом пара глаз и два выроста с обеих сторон наподобие ушей (рис. 1).



Рис. 1. Пресноводный ресничный плоский червь планария *G. tigrina*

В длину *G. tigrina* вырастает до 2–2,5 см. Снаружи тело покрыто однослойным эпителием с большим количеством железистых и чувствительных клеток, реагирующих на запахи, прикосновение, вибрации, движение воды, а также клетками с рабдитами. *G. tigrina* – хищник, снабженный эффективными средствами нападения и защиты. Таковыми являются слизь железистых клеток, обездвиживающих потенциальную жертву для последующего поедания, и ядовитый секрет рабдитных клеток, делающий планарию несъедобной для других хищников. Дышит *G. tigrina* растворенным в воде кислородом, который поступает в организм через всю поверхность тела. Двигательная система представлена кожно-мышечным мешком, состоящим из кольцевых, продольных и радиальных мышц. Объект охоты планария обволакивает слизью, выделяемой железистыми клетками на брюшной стороне тела, прикрепляется к ней и из ротового отверстия выставляет мускулистую глотку, которая проникает внутрь жертвы и высасывает из нее содержимое. Из глотки пища поступает в трехветвистый кишечник. Одна ветвь расположена в передней части тела, две остальные – в задней (отсюда название отряда *Tricladida* – трехветвистые). Каждая ветвь имеет множество дополнительных ответвлений. Органами выделения являются расположенные по бокам тела протонефридии, открывающиеся наружу многочисленными выделительными порами. Анальное отверстие отсутствует. Непереваренные остатки пищи выбрасываются через рот [9].

Планарий содержали в затененном месте при комнатной температуре 22–24 °С в стеклянном сосуде с плоским дном. На дне сосуда были уложены несколько плоских камней, под которыми большую часть времени скрывались планарии (планария избегает яркую освещенность). Сосуд заполняли на 1/3 дистиллированной водой и на 2/3 артезианской водой, представленной в аптечных магазинах детской питьевой водой «Малышка» (эта вода добывается из скважины № 3 в поселке Нижний Архыз на высоте 1100 м над уровнем моря в особо охраняемой зоне на границе с Тебердинским государственным биосферным заповедником КЧР РФ). Минерализация воды «Малышка» составляет 0,1–0,3 г/дм<sup>3</sup>. Химический состав в мг/дм<sup>3</sup>:  $\text{HCO}_3^-$  – 50–200;  $\text{SO}_4^{2-}$  < 15;  $\text{Mg}^{2+}$  < 50;  $\text{Ca}^{2+}$  < 60;  $\text{Cl}$  < 15;  $\text{N}^+ + \text{K}^+$  < 20. Кормили планарий живым или замороженным мотылем – личинками комара-звонца каждые 5–7 сут (по нашим наблюдениям *G. tigrina* достаточно легко переносит длительное голодание). Для полетного эксперимента использовали 209 планарий и 393 – для наземного.

**Научная аппаратура (НА).** По заказу РКК «Энергия» им. С.П. Королева НПП «БиоТехСис» для настоящего эксперимента была разработана и изготовлена специальная НА. Она состояла из двух инкубационных контейнеров «Планария» и автоматического регистратора температуры (АРТ). Каждый контейнер представляет собой сосуд с крышкой из алюминиевого сплава Д16 размерами  $\text{Ø}85 \times 80$  мм, массой 0,3 кг и включает три инкубационные капсулы из полупрозрачного полистирола размерами  $\text{Ø}30 \times 65$  мм с внутренним объемом 20 мл (рис. 2). Герметичность контейнеров обеспечивается двойным уровнем защиты за счет двух резиновых прокладок. При помощи АРТ осуществляется постоянный мониторинг и визуализация температуры воздушной среды в непосредственной близости от контейнеров и ее регистрация в автоматическом режиме каждые 3 ч. Питание АРТ от двух батарей типа АА. Габаритные размеры АРТ –  $134 \times 52 \times 45$  мм, масса – 0,3 кг. Корпус выполнен из полиамида (рис. 3).



Рис. 2. Внутреннее содержание слева и внешний вид контейнера «Планария»

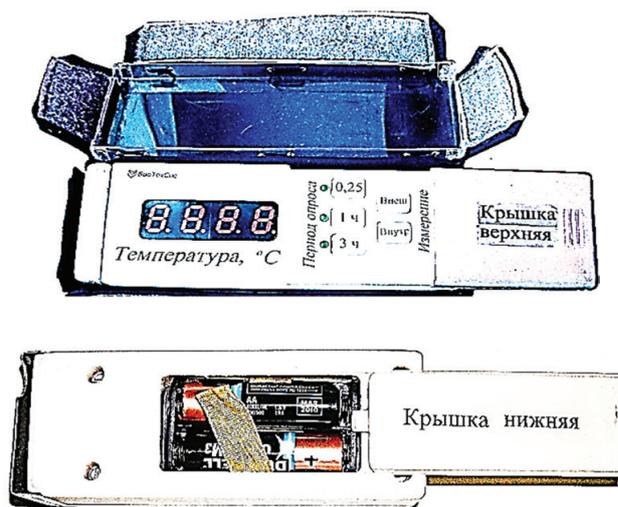


Рис. 3. АРТ

**Подготовка КЭ.** За 2–7 сут до старта планарии были доставлены из Москвы на техническую позицию в лабораторный комплекс на площадке № 254 космодрома Байконур.

За 10–12 ч перед стартом корабля планарии наркотизировали и после полного обездвижения поперечным разрезом расчленили на 1–4 фрагмента; разрезали продольно по всей длине на две половины; отрезали голову и оставшуюся часть туловища разрезали продольно на две части (рис. 4).

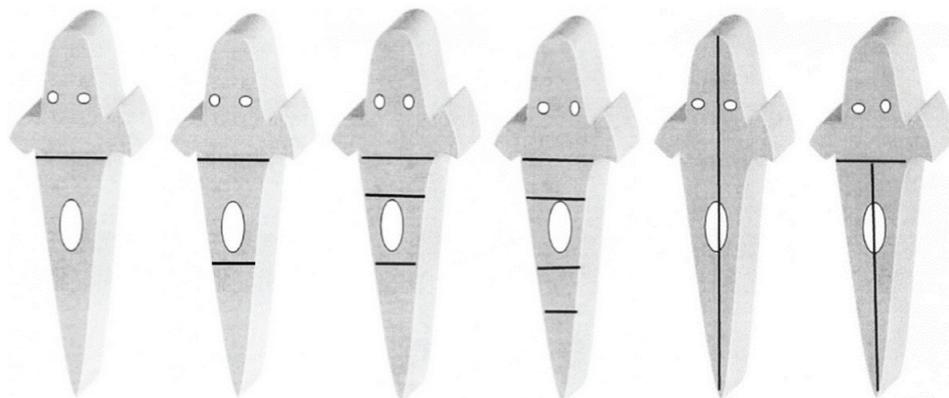


Рис. 4. Схематическое изображение вариантов деления планарии на фрагменты

Интактные планарии и фрагменты планарий помещали в капсулы, предварительно заполненные 5 мл дистиллированной воды и 10 мл артезианской воды «Малышка» (в одной капсуле – до восьми интактных планарий и от 3 до 15 фрагментов). Капсулы с плотно завинченными крышками укладывали в инкубационные контейнеры и закрывали крышкой. Контейнеры укладывали в транспортировочные чехлы, дезинфицировали 3 %-м раствором перекиси водорода и размещали в пилотируемые космические корабли «Союз» и транспортные грузовые корабли «Прогресс» для доставки на МКС. Члены российского экипажа переносили НА на российский сегмент (РС) МКС и размещали в служебном модуле (СМ) на панели № 406. Там же находился дозиметрический датчик «Пилле» для определения радиационного фона в непосредственной близости от НА.

Длительность КЭ в ОП составила:

9 сут (15 апреля – 24 апреля 2005 г.);

10 сут (1 октября – 11 октября 2005 г.);

10 сут (30 марта – 9 апреля 2006 г.);

14 сут (7 апреля – 21 апреля 2007 г.);

11 сут (10 октября – 21 октября 2007 г.);

12 сут (12 октября – 24 октября 2008 г.);

34 сут (5 февраля – 11 марта 2014 г.);

35 сут (9 апреля – 14 мая 2014 г.);

- 23 сут (17 февраля – 12 марта 2015 г.);
- 11 сут (19 сентября – 30 сентября 2016 г.);
- 47 сут (20 февраля – 10 апреля 2017 г.);
- 34 сут (16 ноября – 20 декабря 2018 г.).

В 12 КЭ на орбиту были отправлены 43 интактные планарии и 259 фрагментов планарий. Интактные планарии и их фрагменты, образующие контрольную группу, находились в аналогичных «полетным» капсулах и контейнерах при температуре, близкой к бортовой. После завершения экспедиций сотрудники РКК «Энергия» извлекали НА из спускаемого аппарата и передавали представителю ИМБП. Спустя 8–10 ч после посадки спускаемого аппарата НА доставляли в Москву, в ИМБП.

**Методы исследования.** Фактическую документальную информацию получали в режиме фото- и видеосъемки. Изображения планарий и их фрагментов перед полетом, а также полученного материала после полета создавали с помощью специальной установки, состоящей из микроскопа МБС-9, оборудованного видеокамерой CCD Color Camera CV-7017H (Sony, Japan), устройства для видеозахвата AverTV Cardbus Plus (AverMedia, Taiwan) и ноутбука Lenovo (China). Часть планарий фиксировали в 2,5 %-м растворе глутаральдегида на фосфатном буфере с дофиксацией в 1 %-м растворе четырехоксида осмия и последующим обезвоживанием в спиртах возрастающей концентрации. Далее образцы высушивали при критической точке в среде амилацетата и углекислоты. Для придания электропроводности переносили на токопроводящую графитовую пленку, наклеенную на небольшие предметные столики из алюминия, размещали в катодно-ионный испаритель E5100 и напыляли золотом в атмосфере аргона при напряжении 2,2 кВ, силе тока 20 мА, давлении 0,1 атм. После указанных процедур препараты размещали на предметные столики и рассматривали в сканирующем электронном микроскопе CamScan (Oxford, Великобритания).

## Предполетные исследования

**Локомоция.** *G. tigrina* в воде перемещается двумя способами: на поверхности и в толще воды плавным скольжением при помощи многочисленных ресничек, покрывающих ее брюшную поверхность, и ползанием по субстрату при помощи сокращения-выпрямления тела. На участке брюшной поверхности 50 мкм<sup>2</sup> можно было насчитать до 350 ресничек, каждая длиной до 40 мкм и толщиной 0,5 мкм (рис. 5). Биение ресничек совершается исключительно в направлении головы и по этой причине фрагменты планарий в воде перемещаются в ту же сторону.

**Питание.** На брюшной поверхности *G. tigrina* расположено ротовое отверстие, за которым следует расширение, т. н. глоточный карман – местонахождение выдвижной мускулистой глотки (рис. 6).

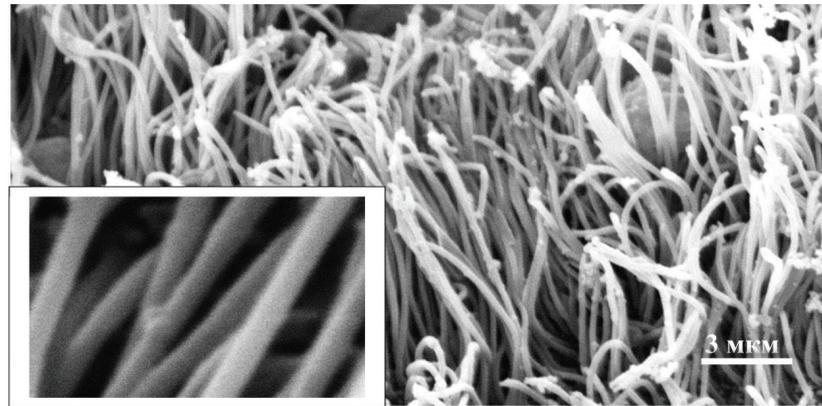


Рис. 5. Покрытый ресничками участок на брюшной поверхности планарии.  
Слева в рамке реснички при большом увеличении

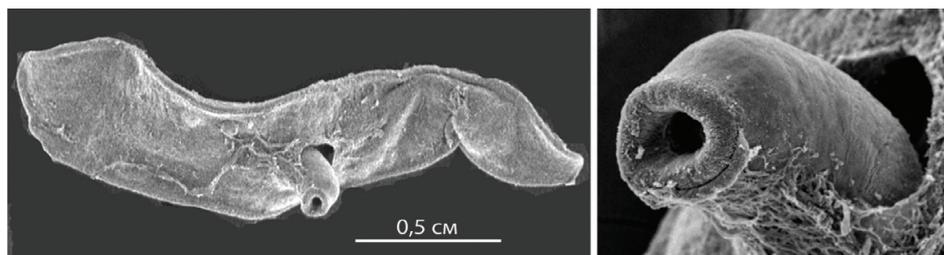


Рис. 6. *G. tigrina* с выступающей глоткой из ротового отверстия  
на брюшной стороне тела слева и глотка при большом увеличении

Глотка обладает высокой подвижностью и благодаря продольной и кольцевой мускулатуре может сильно вытянуться, почти до длины самой планарии, и также сильно сжаться. Голодная планария постоянно в поисках пищи. При помощи видеозаписи удалось запечатлеть весь процесс поедания мотыля. Задней частью своего тела планария прикрепляется к мотылю, из глоточного кармана выдвигается глотка, которая сквозь покровы проникает внутрь мотыля. Глотка действует наподобие водного насоса. Ритмично расширяясь и сжимаясь, набирает содержимое из мотыля и затем выталкивает его в кишечник. Из глотки содержимое мотыля поступает в переднюю часть трехветвистого кишечника, оттуда в задние правую и левую ветви, заполняя многочисленные отростки кишечника. Этот процесс длится от 3 до 9 мин, пока планария не приобретет розовый цвет из-за крови, содержащейся в мотыле. Не всегда удается планарии с первого раза проникнуть в тело мотыля. Глотка может перемещаться внутри мотыля и сильно вытягиваться в поисках мест с большим наполнением кровью. Полностью насытившись, планария извлекает глотку из мотыля, открепляется от нее и становится

малоподвижной (рис. 7). Переваривание пищи занимает определенное время. Продукты переваривания выводятся из расположенных по бокам тела отверстий. Непереваренные остатки пищи сильными сокращениями тела выбрасываются изо рта. Спустя 4–5 сут розовый окрас планарии постепенно сходит на нет и она приобретает привычный серовато-бурый цвет.

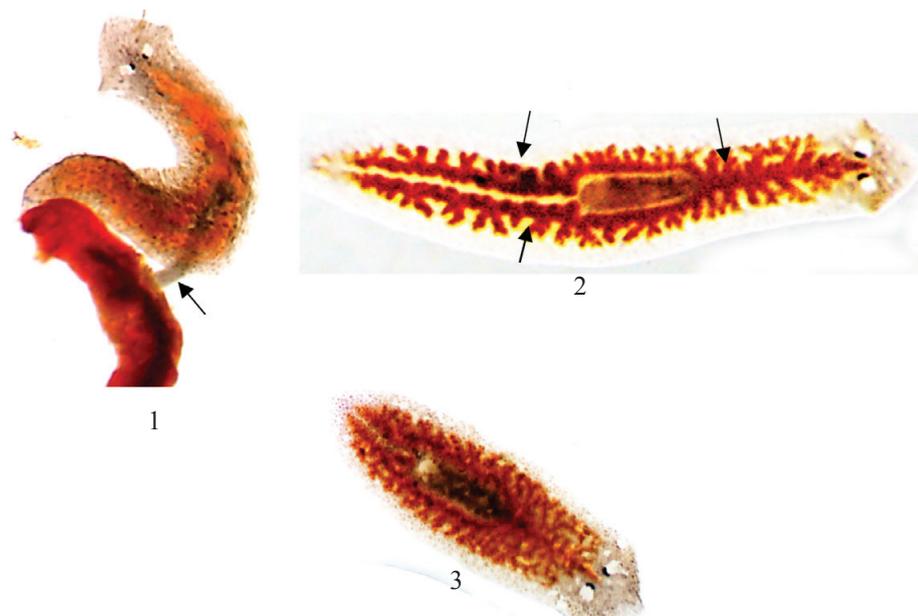


Рис. 7. *G. tigrina*, питание мотылем:

1 – глотка в теле мотыля; 2 – вид планарии после поедания мотыля. (Розовым цветом отчетливо прорисовывается трехветвистый кишечник с многочисленными ответвлениями. Стрелками отмечены передняя и две задние ветви кишечника); 3 – планария в состоянии переваривания пищи

**Размножение.** Бесполое размножение *G. tigrina* совершается путем поперечного деления тела и выглядит следующим образом: достигнув определенного размера, в средней части планарии за глоткой появляется борозда. Она постепенно перетягивает туловище и в конце концов полностью отделяет заднюю часть от передней (рис. 8).



Рис. 8. Поперечное деление (отмечено стрелками) *G. tigrina* слева и отделившаяся задняя часть тела планарии

На местах отрыва с обеих сторон остаются небольшие выемки. Они довольно быстро заполняются бластемой, из которой для переднего фрагмента формируется недостающая задняя часть тела, а для заднего фрагмента – головной конец и новая глотка. Весь этот процесс образования двух планарий из одной занимает 6–7 сут. С появлением глотки они способны охотиться и расти и в течение 18–20 сут дорастают до размеров материнского организма.

**Регенерация.** Порезы, нанесенные на теле *G. tigrina*, полностью заживают в течение 1–2 сут. На рис. 9 изображена планария, у которой лезвием почти полностью была отрезана голова и с туловищем ее соединял небольшой кожный тяж. Рана быстро начала заживляться, и спустя двое суток голова полностью срослась с туловищем. *G. tigrina* можно расчленить на множество фрагментов и каждый из них сохраняет способность к регенерации тем же способом, что имеет место при делении планарии естественным путем на переднюю и заднюю части тела. Фрагменты планарии, полученные путем ее расчленения поперечными разрезами тела, на раздражающий фактор демонстрируют присущую интактной планарии реакцию избегания и, следовательно, для этого голова им вовсе не нужна. На прикосновение они сначала сжимаются, затем вытягиваются и быстро уползают/отплывают в сторону отсутствующей головы. При этом могут поворачиваться вправо/влево, обгибать препятствия, но никогда не перемещаются, как и интактная планария, в противоположном голове направлении. Фрагменты, полученные продольным разрезом тела на две половины, сразу сворачиваются в кольцо и начинают быстро вращаться – левая половина по часовой стрелке, правая половина против часовой стрелки. Восстановление недостающих частей тела, утраченных при оперативном вмешательстве, у *G. tigrina* протекает таким способом, как и при ее естественном делении. У фрагментов на местах разреза появляется бластема, из которой в течение одной недели формируется недостающая часть тела: у передних фрагментов отрастают задние части тела, у хвостовых – передние, у туловищных – как передние, так и задние части тела. При продольном расчленении планарии со временем к каждой половине прирастает недостающая часть тела: к правой половине – левая сторона, к левой половине – правая сторона.

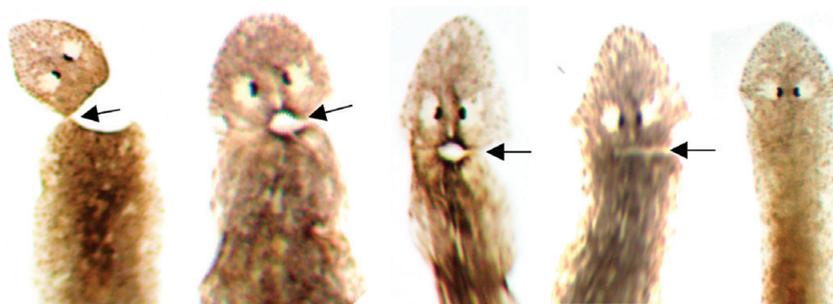


Рис. 9. Заживление раны у *G. tigrina* (раневая зона отмечена стрелками)

### Эксперимент на орбите

В ОП температура воздуха в зоне расположения НА колебалась в пределах 24–22 °С. По показателям дозиметрического датчика «Пилле» доза радиации в непосредственной близости НА составила 2,5 мкГр/сут (в Москве этот показатель составляет в среднем 0,3 мкГр). При вскрытии инкубационных капсул спустя 10–11 ч после завершения ОП наблюдалась следующая картина: все фрагменты планарий вернулись на Землю, превратившись в полноценные особи, и они мало чем отличались от планарий, регенерировавших из аналогичных фрагментов при 1 г. У головных фрагментов отросли недостающие задние части тела, у хвостовых – передние, у туловищных – как передние, так и задние части тела. В обоих случаях отличие от материнских планарий выразалось лишь в их меньших размерах (рис. 10).

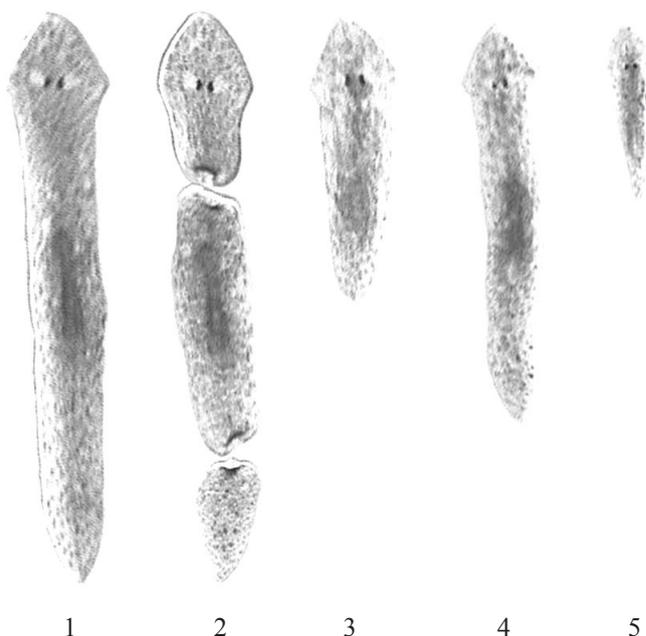


Рис. 10. Регенерация *G. tigrina* в ОП:

1 – планария в интактном состоянии; 2 – разделка планарии на головной, туловищный и хвостовой фрагменты (за 12 ч перед стартом КК); 3–5 – регенерировавшие планарии из головного, туловищного и хвостового фрагментов (спустя 11 ч после завершения КЭ)

У продольно разрезанных планарий были восстановлены недостающие части тела: у правой половины появилась левая сторона, у левой половины – правая сторона. Перед полетом 43 интактные планарии были помещены в капсулы, где их число увеличилось до 47. «Лишние» четыре планарии появились в ОП, и они имели заметно меньшие размеры в сравнении с остальными. Помимо этого у трех интактных планарий отсутствовала задняя часть туловища. На месте ее отрыва имелась бластема. Она также была представлена

у хвостового фрагмента, который своим видом соответствовал трехсуточному регенерату. У другого фрагмента бластема отсутствовала. Очевидно, он мог образоваться ближе к завершению полета, либо во время транспортировки НА и ее доставки в лабораторию. Отделившаяся задняя часть от третьей планарии отсутствовала. Вместо нее в капсуле было обнаружено полупрозрачное образование, очевидно, оставшееся после ее разложения. В одну капсулу перед полетом были размещены семь безголовых фрагментов. После полета все они оказались с регенерировавшими головами. Кроме того, в этой же капсуле оказалась небольшого размера планария, которая могла появиться от заднего (хвостового) фрагмента при делении регенерировавшей в ОП планарии (рис. 11).



Рис. 11. *G. tigrina*, появившаяся от заднего фрагмента при делении регенерировавшей планарии (23-суточный ОП. Спустя 13 ч после завершения КЭ)

У другой регенерировавшей планарии отсутствовала задняя часть тела. На конце ее имелась бластема. Образовавшийся от этой планарии фрагмент также оказался в стадии регенерации с хорошо развитой бластемой. Планарии, регенерировавшие в ОП из поперечно нарезанных фрагментов, как и таковые при 1 g, заметно отставали в размерах от «материнских» планарий. После полета они дорастали до них в течение двух недель при условии обильного кормления. У интактных и регенерировавших планарий после ОП локомоторная активность в виде плавного скольжения или последовательного сокращения-распрямления тела, как и пищедобывательное поведение, были в пределах нормы. При опускании мотыля в воду регенерировавшие в ОП планарии довольно быстро определяли его местонахождение. Они прикреплялись к мотылю, выставляли глотку, которая проникала внутрь мотыля и перекачивала его содержимое в кишечник (рис. 12–14). После питания у них заметно снижалась двигательная активность вплоть до полного покоя. Как в ОП, так и при 1 g регенерация *G. tigrina* осуществлялась вне зависимости от освещенности. Герметически закрытые металлические контейнеры полностью исключали проникновение света в капсулы с планариями.



Рис. 12. *G. tigrina*, регенерировавшая из туловищного фрагмента, после питания мотылем (33-суточный ОП. Спустя 13 ч после завершения КЭ)



Рис. 13. *G. tigrina*, регенерировавшая из головного фрагмента, после питания мотылем (23-суточный ОП. Спустя 11 ч после завершения КЭ)

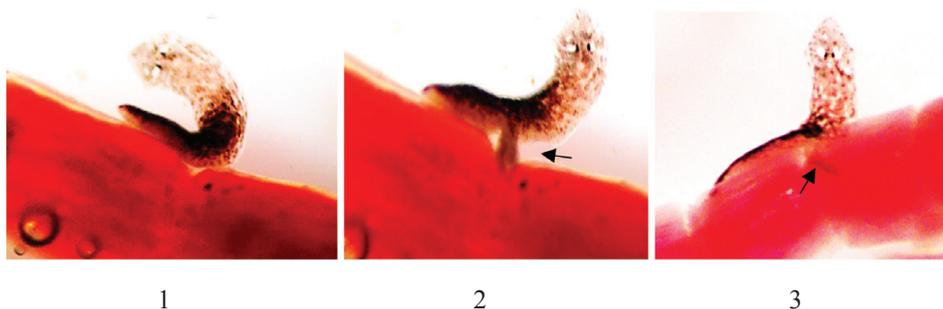


Рис. 14. *G. tigrina*, регенерировавшая из заднего фрагмента после питания мотылем: 1 – прикреплена к мотылю; 2 – с выставленной глоткой; 3 – глотка в теле мотыля (47-суточный ОП. Спустя 12 ч после завершения КЭ)

Отрезание головной части тела у регенерировавшей в ОП планарии после полета сопровождалось появлением на месте разреза новой бластемы, которая в течение одной недели повторно регенерировала в удаленную головную часть тела планарии (рис. 15).



Рис. 15. Повторная регенерация головной части планарии: 1 – бластема на 3-и сутки после ампутации регенерировавшей передней части тела планарии. Граница отрастания бластемы отмечена прерывистой линией; 2 – регенерация на 9-е сутки после ампутации (12-е сутки после завершения КЭ)

## Заключение

Планария – трижды знатное существо. Помимо удивительной способности клонировать себя путем фрагментации и последующего достраивания недостающих частей тела (архитомия), она обладает и другими способностями. В 1865 г. Илья Мечников у планарии обнаружил внутриклеточное пищеварение: колбовидные клетки ее кишечника при поступлении пищи приобретали подвижность, окружали частицы пищи и поглощали их. Так было открыто явление фагоцитоза. Впоследствии оказалось, что «клетки-пожиратели» присущи всем животным организмам, в том числе человеку. Спустя годы, Илья Мечников был удостоен Нобелевской премии по медицине за работы в области иммунологии (1908). Проявила себя планария и на стезе изучения механизмов памяти. Американский зоопсихолог McConnell [10] вырабатывал у планарий условный рефлекс на сочетание света с электрической стимуляцией. После нескольких повторений такой процедуры один только свет вызывал сокращение планарии. Затем планарию расчленили поперек тела на два фрагмента. Регенерировавшая из заднего фрагмента планария на предъявление света реагировала сокращением тела, как и регенерировавшая из переднего головного конца, где располагался мозг (нервный ганглий) планарии. Объяснение этого феномена было следующим: памятный след в виде «молекул памяти» сохранялся в недифференцированных и богатых РНК клетках-необластах, из которых впоследствии формировалась бластема, из бластемы – отсутствующая часть тела.

В ходе 12 экспедиций на МКС у *G. tigrina* была установлена сохранность, во-первых, размножаться бесполом путем и, во-вторых, воссоздания из фрагментов целого организма в невесомости. Они отращивали новые структуры взамен утраченных, «рассчитывая» исключительно на свои внутренние ресурсы. Другими словами, оба эти процесса – размножение делением и восстановление из фрагментов путем достраивания утраченных частей тела, в ОП совершались таким же образом, как и при 1 g. На месте разреза появлялась бластема, из которой впоследствии появлялась отсутствующая часть тела. Несколько планарий в полете размножились посредством поперечного деления. Локомоторная активность и пищедобывательная реакция планарий, регенерировавших и «родившихся» в невесомости, после возвращения на Землю были в пределах нормы. Повторная регенерация при 1 g регенерировавших в ОП планарий протекала без каких-либо заметных изменений. Таким образом, генетическая программа восстановительного морфогенеза *G. tigrina* реализовалась вне зависимости от гравитационного фактора среды. Невесомость не явилась чуждой средой для такого существа как планария, у которой были сохранены два важнейших признака, присущие земным организмам, – размножение и регенерация.

*Автор выражает благодарность экипажам РС МКС космонавтам С. Крикалёву, В. Токареву, П. Виноградову, О. Артемьеву, А. Иваншину, А. Скворцову, А. Тюрину, Ю. Маленченко, А. Овчинину, Ф. Юрчихину, О. Котову, С. Рыжикову и А. Борисенко, сотрудникам РКК «Энергия» им. С.П. Королёва» и ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» за содействие при выполнении настоящей работы.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мэттсон, П. Регенерация – настоящее и будущее / Присцилла Мэттсон; пер. с англ. А.Л. Лиознера. – Москва: Мир, 1982. – 176 с.
- [2] Короткова, Г.П. Регенерация животных. – С.-Петербург: СПбГУ, 1997. – 479 с.
- [3] Montgomery, J.R. On the Minimal Size of a Planarian Capable of Regeneration / J.R. Montgomery, S.J. Coward // Transactions of the American Microscopical Society. – 1974. – Vol. 93 (3). – P. 386–91.
- [4] Reddien, P.W. Fundamentals of Planarian Regeneration / P.W. Reddien, A.S. Alvarado // Annual Review of Cell and Developmental Biology. – 2004. – Vol. 20. – P. 725–757.
- [5] Формирование регенерационной бластемы у планарии *Girardia tigrina* / Х.П. Тирас, О.Н. Петрова, С.Н. Мякишева, К.Б. Асланиди // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7(3). – С. 493–500.
- [6] Отсутствие силы тяжести не препятствует регенерации утраченных частей тела (эксперименты на ресничных червях, брюхоногих моллюсках и хвостатых амфибиях) / Г.И. Горгиладзе, Е.В. Короткова, Н.М. Тихонравова, Ю.В. Новоженнова // Материалы XIII конференции «Космическая биология и авиакосмическая медицина». К 45-летию первого полета человека в космос. 13–16 июня 2006 г., Москва, Россия. – 2006. – С. 81–82.
- [7] Горгиладзе, Г.И. Регенерационная способность у планарий, экспонированных в невесомости в орбитальном полете на Международной космической станции / Г.И. Горгиладзе, Е.В. Короткова, Н.М. Тихонравова // Материалы Пятого Международного аэрокосмического конгресса. 27–31 августа 2006 г., Москва, Россия. – 2006. – С. 214 – 215.
- [8] Горгиладзе, Г.И. Регенерационная способность у планарий *Girardia tigrina* и улиток *Helix lucorum*, экспонированных в невесомости в орбитальном полете на Международной космической станции // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 421. – № 1. – С. 131–134.
- [9] Жизнь животных / Под ред. Ю.И. Полянского. – Т. 1. – Москва: Просвещение, 1987. – 448 с.
- [10] McConnell, J.V. Comparative Physiology. Learning in Invertebrates // Ann. Rev. Physiol. – 1966. – Vol. 28. – P. 107–136.

## REFERENCES

- [1] Mattson, P. Regeneration – Present and Future. Transl. from English. – Moscow: MIR, 1982. – 176 p.
- [2] Korotkova, G.P. Animal regeneration. – St. Petersburg: St. Petersburg State University, 1997. – 479 p.
- [3] Montgomery, J.R. On the Minimal Size of a Planarian Capable of Regeneration / J.R. Montgomery, S.J. Coward // Transactions of the American Microscopical Society. – 1974. – Vol. 93(3). – P. 386–91.

- [4] Reddien, P.W. Fundamentals of Planarian Regeneration / P.W. Reddien, A.S. Alvarado // *Annual Review of Cell and Developmental Biology*. – 2004. – Vol. 20. – P. 725–757.
- [5] Formation of the Regeneration Blastema in Planaria Girardia Tigrina / Kh.P. Tiras, O.N. Petrova, S.N. Myakisheva, K.B. Aslanidi // *Fundamental research*. – 2015. – No 7(3). – P. 493–500.
- [6] The Absence of Gravity does not Prevent the Regeneration of Lost Body Parts (Experiments on Ciliary Worms, Gastropods, and Tailed Amphibians) / G.I. Gorgiladze, E.V. Korotkova, N.M. Tikhonravova, Yu.V. Novozhenova // *Proceedings of the XIII Conference “Space Biology and Aerospace Medicine”. On the 45th Anniversary of the First Human Spaceflight*. June 13–16, 2006, Moscow, Russia. – 2006. – P. 81–82.
- [7] Gorgiladze, G.I. Regenerative Capacity of Planarians Exposed to Weightlessness in Orbital Flight on the International Space Station / G.I. Gorgiladze, E.V. Korotkova, N.M. Tikhonravova // *Proceedings of the 5th International Aerospace Congress*. August 27–31, 2006, Moscow, Russia. – 2006. – P. 214–215.
- [8] Gorgiladze, G.I. Regenerative Capacity in Planarians Girardia Tigrina and Snails Helix lucorum Exposed to Weightlessness in an Orbital Flight on the International Space Station // *Reports of the Academy of Sciences*. – 2008. – Vol. 421, No 1. – P. 131–134.
- [9] *Animal life* / Ed. by Ju.I. Polansky. – Vol. 1. – Moscow: Prosveshcheniye, 1987. – 448 p.
- [10] McConnell, J.V. Comparative Physiology. Learning in Invertebrates // *Ann. Rev. Physiol.* – 1966. – Vol. 28. – P. 107–136.