

УДК 573.5+629.78

ПОИСК ВНЕЗЕМНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ НА КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ ИЗ КОСМОСА

© 2020 г. Г. К. Гарипов^{1,*}, М. И. Панасюк^{1,2}, С. И. Свертилов^{1,2}, И. В. Конюхов³,
С. И. Погосян³, А. Б. Рубин³, Д. Е. Андреев⁴

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия

²Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³Биологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴Научно-исследовательский институт физико-химической биологии им. А. Н. Белозерского
МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*ggkmsu@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.06.2019 г.

После доработки 10.06.2019 г.

Принята к публикации 19.09.2019 г.

Задача поиска микроорганизмов на космических телах Солнечной системы имеет большое значение для понимания проблемы происхождения жизни. В настоящее время, трудно создать специализированные лаборатории, проводящие поиск живых микроорганизмов на поверхности планет или космических тел, которые либо образовались в Солнечной системе, либо были захвачены притяжением Солнца из межзвездного пространства. Существующие эксперименты по поиску жизни на спускаемых аппаратах, а также планетоходах позволяют проводить такие исследования на поверхности планет и их спутников, но на ограниченной площади вблизи места посадки. В данной работе рассматривается метод зондирования из космического пространства вспышками света космических тел, с помощью которого можно проводить исследования практически по всей их поверхности с целью обнаружения биоактивности. Признаком наличия биоактивности является обнаружение специфического свечения микроорганизмов при освещении их излучением, вызывающим флюоресценцию.

DOI: 10.31857/S0023420620040056

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение микроорганизмов на космических телах Солнечной системы имеет огромное значение для понимания проблемы возникновения жизни на Земле, определения ее первоисточника, и выявления условий, способствовавших ее возникновению.

В настоящее время сложно создать специализированные биологические лаборатории, проводящие исследования по поиску живых микроорганизмов на поверхности планет или других телах как образовавшиеся в Солнечной системе, так и захваченные притяжением Солнца из межзвездного пространства.

Существующие исследования на спускаемых аппаратах, а также планетоходах позволяют проводить такие исследования на поверхности планет и их спутников, но в ограниченной области вблизи места посадки. Учитывая тот факт, что редко встречающиеся формы жизни, как правило, образуют колонии или сообщества, существующие в ограниченном пространстве в труднодо-

ступных местах, задача поиска микроорганизмов еще более усложняется.

Автономные вертолеты или другие активные летающие средства, которые могут запускаться со спускаемого аппарата после его посадки на поверхность планеты, также имеют ограниченные возможности по дальности полета и грузоподъемности из-за низкой плотности атмосферы, и являются бесполезными для исследований на большинстве из космических тел Солнечной системы, где атмосфера практически отсутствует. На космических объектах с плотной атмосферой для таких устройств велики риски аварийного разрушения аппарата из-за турбулентности атмосферы и потери аппарата в случае сильных ветров. Воздушные шары и дирижабли также представляются малоэффективными из-за случайных траекторий их полета, что не позволяет обследовать заранее заданные и наиболее интересные области космических объектов, а также проводить в нужных районах повторные измерения.

Например, на Марсе сила притяжения примерно в три раза меньше, чем на Земле, но низкая

плотность атмосферы, соответствующая земной на высоте примерно 30 км, для полетов в таких условиях существенно усложняется конструкция летательных аппаратов. При этом из-за низкого давления снижается их грузоподъемность и дальность полета даже при благоприятных метеоусловиях при полетах на малых высотах, по сравнению с летательными аппаратами, используемыми в земных условиях.

В настоящей работе для поиска биологических объектов предложены методы дистанционного зондирования вспышками света поверхности космических объектов, позволяющими из космического пространства обследовать представляющие интерес области, которые соизмеримы с размерами космических объектов. Такие исследования можно проводить как на пролетных траекториях космического аппарата вблизи космического объекта, или на орбите его искусственного спутника, так и на поверхности космического тела после посадки спускаемого аппарата. Признаком существования живых микроорганизмов в этом случае являются характерные параметры флюоресценции, регистрации которых может проводиться многократно, с целью улучшения распознавания сигнала и достижения необходимой точности измерения, поскольку микроорганизмы при воздействии оптического излучения не разрушаются.

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ НА КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Не вызывает сомнений, что жизнь начиналась с появления микроорганизмов и продолжается с их участием, время существования которых сравнимо с возрастом Земли. По мнению авторитетных биологов, первыми появились на Земле хемиавтотрофы, получающие энергию за счет реакций окисления ряда веществ в анаэробных условиях [1]. Хемиавтотрофные микроорганизмы имеют низкий КПД и не способны произвести большое количество органического вещества для питания гетеротрофных организмов. Фотоавтотрофные микроорганизмы, использующие энергию света для синтеза органических веществ, окисляют воду с образованием кислорода в атмосфере Земли. Эти организмы создали достаточное количество органических веществ и кислорода, необходимых для поддержания жизнедеятельности гетеротрофных организмов на Земле, включая человека.

Микроорганизмы, существующие на Земле способны к размножению и после пребывания в экстремальных условиях, выдерживают большие перепады температур, воздействие вакуума, ионизирующего излучения и других неблагоприятных факторов. Известно, что некоторые микроорга-

низмы способны выживать в открытом космосе, например, на внешней обшивке *МКС*. Это позволяет предположить, что и на планетах Солнечной системы можно встретить подобные микроорганизмы [2], способных выживать в агрессивной среде, которые могли попасть туда из космоса.

Эти особенности устойчивого существования микроорганизмов позволяют предположить, что инопланетную жизнь следует искать, прежде всего, на уровне микроорганизмов, которые способны существовать в открытом космосе и выживают в экстремальных условиях. Как правило, микроорганизмы образуют локальные скопления или колонии. В настоящее время обнаружение микроорганизмов планируется проводить в микробиологических лабораториях, устанавливаемых на спускаемых аппаратах. Взятые случайным образом для исследования пробы в ограниченном районе, удобном для посадки спускаемого аппарата, снижают вероятность обнаружения микроорганизмов на космическом объекте, для существования которых требуются иная окружающая среда.

Жизнь гетеротрофных микроорганизмов могла появиться только в среде с высоким содержанием органических веществ, способных обеспечить питание этих организмов. Известно, что некоторые органические молекулы могут образоваться из неорганических веществ в экстремальных условиях, например, в электрическом разряде и служить источником питания. Однако этот процесс маловероятен и, кроме того, органические молекулы получают не устойчивыми, которые под действием УФ и ионизирующего излучения распадаются. Поэтому значительных запасов органических веществ, полученных за счет абиотических процессов на каком-либо космическом объекте, ожидать не приходится. В земных условиях хорошо известны хемоавтотрофные микроорганизмы, живущие за счет энергии окисления минеральных субстратов. Но их доля в суммарной продукции органических веществ не превосходит 1%. Только появление фотосинтезирующих организмов на Земле привело к образованию органических веществ в гигантских количествах. Именно фотосинтезирующие организмы были и являются пищевым фундаментом для практически всего биологического многообразия нашего мира и могут служить основой для зарождения жизни на космических телах.

Солнечный свет является главным источником энергии на Земле и соседних с ней планетах. Фотоавтотрофные организмы на Земле образуют более 99% органического вещества за счет процессов утилизации света — фотосинтеза. Практически вся остальная биота (бактерии, грибы, животные) питаются за счет органических веществ, образованных фотоавтотрофными организмами. На Земле фотоавтотрофные организмы появи-

лись вскоре после того, как на нашей планете появилась жидкая вода. Если предположить, что земная жизнь возникла в результате панспермии и таким же образом появилась жизнь в благоприятных условиях на других планетах Солнечной системы, то, видимо, и способ получения органических веществ на этих планетах должен быть таким же, как на Земле. Конечно, в других, нежели чем на Земле условиях, фотосинтетический аппарат инопланетных фотоавтотрофных организмов (если они есть) может несколько отличаться от того, что есть на Земле. Но принцип получения органического вещества из неорганического — за счет энергии света, видимо, остается неизменным.

Отметим, что принцип работы фотосинтетического аппарата (ФСА) фотоавтотрофных организмов за последние 3.5 миллиарда лет не изменился [3] и вполне возможно существовал и задолго до появления жизни на Земле, например, на малых планетах Солнечной системы. Видимо, такая организация ФСА настолько совершенна и устойчива, что ее изменения в ходе мутаций приводят только к негативным последствиям, которые не сохраняются. ФСА фотоавтотрофных организмов всегда имеет систему пигментов, обладающих высоким коэффициентом поглощения в видимой или ближней ИК области спектра. Все фотосинтезирующие организмы имеют антенный комплекс пигментов, который представляет собой упорядоченную молекулярную структуру, обеспечивающую захват фотонов разных длин волн и направляющих энергию возбуждения в реакционные центры. Известно, что абсолютное большинство молекул хлорофилла входят в состав антенных комплексов. У высших растений и водорослей на один реакционный центр приходится около 300 молекул пигментов. В реакционном центре происходит первичное разделение зарядов, приводящее в действие систему транспорта электронов, образование высоко восстановленных продуктов, а также потенциала на фотосинтетической мембране, за счет которого происходит синтез АТФ. Синтез органических веществ из углекислого газа и воды происходит за счет восстановленных продуктов и энергии АТФ. Этот процесс не нуждается в свете.

Пигменты антенного комплекса под действием света переходят в возбужденное состояние, из которого возможны три пути перехода в основное состояние. Главный путь с квантовым выходом около 95% приводит к разделению зарядов путем переноса электрона с возбужденного молекулярного комплекса на первичный акцептор реакционного центра и протекание реакций фотосинтеза. Другие два пути — тепловое тушение за счет внутренней конверсии и флюоресценция. Квантовый выход флюоресценции хлорофилла земных растений равен 1.5%. Флюоресценция с таким квантовым выходом наблюдается при действии на фо-

тоавтотрофный организм света низкой интенсивности. При действии на тот же объект света высокой интенсивности приводит к насыщению фотосинтеза и блокируется фотосинтетическая система транспорта электрона, что приводит к значительному повышению (до 4–5%) квантового выхода флюоресценции хлорофилла. Максимум спектра возбуждения находится в синей области спектра (около 440 нм). Максимум флюоресценции хлорофилла лежит в длинноволновой области видимого света (>680 нм). Изменения квантового выхода флюоресценции при действии света высокой интенсивности происходят за 250–400 мс в зависимости от интенсивности действующего света.

Метод измерения эффективности флюоресценции не вызывает повреждения организма. Время измерения не превосходит одной секунды. Предельная чувствительность флюориметрического метода в лабораторных условиях — 10^{-13} г пигмента (одиночные клетки планктонных водорослей содержат около 10^{-12} г хлорофилла). Пигменты, не входящие в состав ФСА имеют нулевую эффективность фотосинтеза, что позволяет обнаруживать активно функционирующие объекты. Аппаратура для измерения параметров флюоресценции пигментов имеет малые габариты и низкое энергопотребление.

В настоящей работе для поиска биологических объектов рассмотрен метод дистанционного зондирования вспышками света поверхности космических объектов Солнечной системы прямо из космического пространства с помощью зондирующих аппаратов либо на пролетных траекториях, либо с орбиты искусственного спутника, либо на поверхности планеты или космического объекта после посадки спускаемого аппарата. Признаком биологической активности в этом случае, как уже отмечалось выше, является наличие характерной для микроорганизмов флюоресценции, возникающей при воздействии на объект оптического излучения, возбуждающего их флюоресценцию. Кроме того, с помощью рассматриваемого прибора в случае обнаружения признаков жизни можно проводить детальные исследования микроорганизмов методом флюоресцентного анализа, нашедшего широкое применение в земных лабораториях при изучении биологических объектов.

Как уже упоминалось, методы флюоресцентного анализа не разрушают микроорганизмы. Это позволяет многократно регистрировать сигнал от одного и того же объекта и накапливать необходимую информацию с целью повышения достоверности обнаружения полезного сигнала и последующего анализа свойств обнаруженных объектов.

Отметим, что в настоящее время существуют представления, что все тела Солнечной системы образовались из одного и того же газопылевого

облака и поэтому имеют похожий состав грунтов, что обеспечивает сходство среды обитания микроорганизмов по химическому составу. С другой стороны, как уже отмечалось выше, известно, что молекулярные структуры (пигменты и белковые комплексы на фотосинтетических мембранах), обеспечивающие улавливание световой энергии, и преобразования в энергию химических связей, практически не изменились у существующих фототрофных микроорганизмов за все время существования Земли, возможно существовали и раньше до ее образования. Похожий состав грунтов и устойчивое существование микроорганизмов в экстремальных условиях, включая открытый космос, позволяет надеяться обнаружить похожие микроорганизмы и на других космических объектах Солнечной системы.

Еще одним признаком существования жизни является флуоресценция белка. Все земные организмы содержат белки. Белки также обладают способностью к флуоресценции. Максимумы спектра возбуждения белков находится при длине волны излучения около 280 нм, а испускания флуоресценции около 340 нм. Квантовый выход флуоресценции белков около 20%. Флуоресценция белков дает дополнительную информацию о присутствии биологических объектов на космических телах.

Если предположить, что земная жизнь возникла в результате панспермии и таким же образом появилась жизнь в подобных благоприятных условиях на других планетах Солнечной системы, то, видимо, и способ получения органических веществ на этих планетах должен быть таким же, как на Земле.

Такие микроорганизмы могли быть занесены на планеты либо из межпланетного космического пространства, либо возникли на планетах и их спутниках Солнечной системы, имеющих похожий химический состав поверхности, либо были захвачены Солнечной системой из межзвездного космического пространства под действием сил притяжения Солнца, затем были рассеяны в межпланетном пространстве и занесены на планеты. Если эти микроорганизмы существуют и обладают флуоресценцией, то с помощью современных детекторов их можно будет обнаружить и изучать прямо из космоса при облучении поверхности космических тел вспышками света с помощью предлагаемого в этой работе метода.

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ МИКРООРГАНИЗМОВ ОПТИЧЕСКИМ ДЕТЕКТОРОМ ИЗ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Параметры детектора биологической активности выбирались исходя из задачи обнаружения

оптических сигналов фотоавтотрофных микроорганизмов, как с орбиты искусственного спутника планеты, так и на ее поверхности после посадки спускаемого аппарата. При этом с орбиты искусственного спутника можно вести поиск колоний микроорганизмов на больших площадях, а после посадки космического аппарата на поверхность обнаруживать не только колонии, но и одиночные клетки, попавшие в поле зрения детектора.

Этот же детектор предполагается использовать для изучения оптических явлений в атмосфере, вызванных электрическими разрядами, что представляет интерес при исследованиях среды обитания микроорганизмов. Наличие детектора гамма-квантов позволяет проводить измерения радиационного фона среды, окружающей космический аппарат, а также с помощью этого детектора можно проводить поиск радона, излучение которого можно наблюдать при выходе на поверхность грунтовых вод необходимых для жизнедеятельности микроорганизмов, включая и хемоавтотрофные микроорганизмы.

Для оценок чувствительности оптического детектора в качестве примера в этой работе рассматриваются сигналы, зарегистрированные с расстояния $H = 200$ км при поиске колоний микроорганизмов и 100 м от поверхности космического тела при поиске одиночных микроорганизмов.

Рассмотрим возможности детектора имеющей линзу Френеля площадью $S = 100$ см²; высота орбиты спутника $H = 200$ км, мощность зондирующего излучения лазерного диода $P = 100$ Вт. В этом случае геометрический фактор детектора ω (вероятность попадания кванта света от источника в детектор) составит:

$$\omega = S/4\pi H^2 = 100/4 \cdot 3.14 \cdot (2 \cdot 10^7)^2 = 2 \cdot 10^{-14}.$$

Примем, что энергия фотона $3\text{эВ} \approx 5 \cdot 10^{-19}$ Дж. При излучении лазером в импульсе мощностью 100 Дж за 1 секунду излучается $n = 100/5 \cdot 10^{-19} = 2 \cdot 10^{20}$ фотонов, где n — количество фотонов, излучаемых лазером.

Если квантовый выход флуоресценции фотосинтетических пигментов микроорганизмов около $\nu = 10^{-2}$, то число фотонов флуоресценции излучаемых микроорганизмами попавших в детектор при сплошном покрытии поверхности $\xi = 1$ составит:

$$N = \xi n \nu \omega = 1 \cdot 2 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-14} = 4 \cdot 10^4 \text{ фотонов.}$$

Квантовая эффективность фотокатода ФЭУ $\eta = 0.2$ в ультрафиолетовой и сине-зеленой области оптического спектра, в красной и инфракрасной областях оптического спектра не хуже 0.05.

Таким образом, в ультрафиолетовой и сине-зеленой области оптического спектра от одного

импульса с указанными параметрами в детекторе зарегистрируется $4 \cdot 10^4 \cdot 0.2 = 0.8 \cdot 10^4$ фотоэлектронов, в красной и инфракрасной около $0.2 \cdot 10^4$ фотоэлектронов.

ОЦЕНКА ШУМОВ ДЕТЕКТОРА, ВЫЗВАННОГО ФЛЮКТУАЦИЯМИ ФОНОВОГО СВЕЧЕНИЯ

При изучении космических объектов на теневой стороне будем считать, что на теневой стороне фон в основном вызван рассеянием света звезд от поверхности космического объекта. Фон ночного неба земной атмосферы составляет $\psi_3 = 3 \cdot 10^7$ фотонов/см² · ср · с в новолуние, который вызван в основном рассеянием света звезд в атмосфере и ее облачным покровом. В случае разреженной атмосферы фон ночного неба существенно меньше и в основном определяется альбедо грунтов его поверхности. Поэтому фон ночного неба на космических объектах можно оценить величиной $\psi = 0.8 \cdot 10^7$ фотонов/см² · ср · с.

При угле обзора 5 градусов, что равно 0.08 радиана и высоте орбиты 200 км площадь обзора составит $(200 \cdot 0.08)^2 = 256$ км², а телесный угол обзора составит $\Omega = 256/200^2 = 1.6 \cdot 10^{-3}$.

Число фотонов фона попавших в поле зрения детектора за одну секунду составит:

$$N = \zeta_{\text{ут}} \Omega = 100 \cdot 0.8 \cdot 10^7 \cdot 1 \cdot 1.6 \cdot 10^{-3} \approx \\ \approx 1 \cdot 10^6 \text{ фотонов,}$$

при квантовой эффективности фотокатода 0.2 на фотокатоде образуется $0.2 \cdot 1 \cdot 10^6 = 0.2 \cdot 10^6$ фотоэлектронов, флуктуации которых составят $(0.2 \cdot 10^6)^{1/2} \approx 0.5 \cdot 10^3$ фотоэлектронов в ультрафиолетовой и сине-зеленой области оптического спектра.

Таким образом, при указанных параметрах для одного зондирующего импульса отношение сигнала к шуму составит $S/N = 0.8 \cdot 10^4 / 0.5 \cdot 10^3 \approx 16\sigma$ в ультрафиолетовой и сине-зеленой области оптического спектра. В красной и инфракрасной области это соотношение будет хуже примерно в 2 раза из-за снижения эффективности фотокатода в красной и инфракрасной области оптического спектра.

Дальнейшее улучшение соотношение сигнала к шуму можно получить при увеличении числа зондирующих импульсов и количества лазерных диодов. Например, если число зондирующих импульсов, увеличить в 10 раз, то соотношение сигнала к шуму увеличится в $10^{1/2}$ раз, если же в 10 раз увеличить число лазерных диодов, то в одном суммарном синхронном импульсе полезный сигнал увеличится в 10 раз, а шум останется прежним.

Отметим, что микроорганизмы при вспышках света не разрушаются, поэтому число вспышек света можно многократно увеличивать для дости-

жения необходимой чувствительности. При необходимости также можно увеличить угол обзора детектора, что также увеличит чувствительность детектора из-за того, что наблюдения будут вестись на большей площади.

Если регистрировать флюоресценцию белков, квантовый выход флюоресценции в УФ-области которых $\nu = 0.2$, то для рассматриваемого детектора соотношение сигнал шум увеличится в 20 раз.

Отметим, что в случае синхронной регистрации флюоресценции белков и фотосинтетических пигментов, существенно возрастает достоверность обнаружения микроорганизмов на фоне сигналов флюоресценции, вызванной минералами входящих в состав грунтов космических объектов. Также необходимо отметить, что не вся поверхность покрывается микроорганизмами, но на уровне 3σ при указанных параметрах детектора в случае зондирования поверхности одной вспышкой света, сигнал будет наблюдаться при коэффициенте покрытия поверхности микроорганизмами $\xi = 3/16 \approx 0.2$. Что может быть достаточно для обнаружения биоактивности по флюоресценции при коэффициенте покрытия поверхности микроорганизмами менее 1.

Как уже отмечалось выше, метод зондирования вспышками света не разрушает микроорганизмы, поэтому при многократных измерениях флюоресцентного сигнала можно значительно улучшить соотношение сигнала к шуму, например, при увеличении числа зондирующих импульсов в 100 раз соотношение сигнала к шуму улучшается в 10 раз.

Таким образом, из приведенных расчетов следует, что с помощью рассматриваемого детектора можно с высоты орбиты спутника обнаруживать на поверхности космических объектов компактные колонии микроорганизмов, занимающие поверхности существенно меньшие, чем площадь обзора детектора.

Также отметим, что в случае обнаружения микроорганизмов изменяя частоту, длительность и мощность зондирующего излучения, можно исследовать их биологические особенности методами флюоресцентного анализа, разработанными для исследования микроорганизмов в наземных лабораториях, что позволяет проводить сравнительный анализ биохимических свойств обнаруженных микроорганизмов на космических телах и существующих в земных условиях.

ОЦЕНКА ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ПРИ ПОИСКЕ ОДИНОЧНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ НА ПРОЛЕТНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ ВБЛИЗИ АСТЕРОИДОВ

Оценим уровень сигнала флюоресценции от одного микроорганизма при расстоянии от детектора до поверхности $R = 100$ м, оптической мощности лазерного диода 100 Вт освещающего на исследуемой поверхности площадь $S = 0.01$ м².

В этих расчетах будем считать, что оптические свойства одной клетки подобны свойствам колонии микроорганизмов и отличаются только эффективной площадью поверхности.

При мощности лазерного диода $P = 100$ Вт плотность излучения составит $P/\tilde{S} = 100/0.01 = 10^4$ Вт/м² или $10^4/5 \cdot 10^{-19} = 2 \cdot 10^{22}$ фотонов/м².

Известно, что диаметр клетки водоросли хлореллы равен примерно 10^{-5} м, площадь такой клетки около 10^{-10} м².

Число фотонов, попавших в клетку составит $2 \cdot 10^{22}$ фотонов/м² $\cdot 10^{-10}$ м² = $2 \cdot 10^{12}$ фотонов. При квантовом выходе флуоресценции хлорофилла клетки 10^{-2} поток излучаемого клеткой света составит $10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{12} = 2 \cdot 10^{10}$ фотонов.

Геометрический фактор детектора с площадью линзы $\tilde{S} = 100$ см² на расстоянии $R = 100$ м (10^4 см) составит $\tilde{S}/4\pi R^2 = 100/12 \cdot 10^8 \approx 10^{-7}$. В этом случае от одной клетки в детектор попадет $2 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-7} = 2 \cdot 10^3$ фотонов, или при конверсионной эффективности фотокатода 0.2 сигнал составит около $4 \cdot 10^2$ фотоэлектронов.

Телесный угол обзора детектора в рассматриваемом случае равен $\tilde{S}/H^2 = 0.01/100^2 = 10^{-6}$ ср. При уровне фона $0.8 \cdot 10^7$ фотонов с/см² ср в детектор попадет $0.8 \cdot 10^7 \cdot 10^{-6} = 8$ фотонов.

При конверсионной эффективности фотокатода 0.2 из-за фона образуется около одного фотоэлектрона, что существенно меньше темнового тока ФЭУ, который в хороших ФЭУ составляет несколько десятков фотоэлектронов. Поэтому в этом случае основным источником шумов являются флюктуации тока ФЭУ, которые в нашем случае можно оценить, как 10 фотоэлектронов.

Таким образом, при регистрации сигналов от одиночных микроорганизмов в рассматриваемом случае сигнал превысит уровень шума примерно $4 \cdot 10^2/10$ раз, что составит около 40σ . На уровне 3σ такой сигнал можно обнаружить с расстояний около 200 м.

Как было отмечено выше, конверсионная эффективность флуоресценции белков примерно в 20 раз превышает флуоресценцию фотосинтетических пигментов, что существенно улучшает соотношение сигнал шум, которое составит около $20 \cdot 40\sigma = 800\sigma$.

Таким образом, в рассмотренном примере, чувствительности детектора позволяет обнаружить одиночные микроорганизмы на расстояниях 100 и более метров от источника флуоресцентного излучения, что достаточно для обследования с помощью космических аппаратов поверхности большинства астероидов на пролетных траекториях, проходящих вблизи их поверхности.

Отметим, что при регистрации сигналов от нескольких микроорганизмов, попавших в поле зрения детектора, сигнал флуоресцентного излу-

чения увеличивается пропорционально их числу, поэтому соответственно увеличивается предельное расстояние обнаружения, например, при регистрации сигнала от 4 микроорганизмов в 2 раза. Как было показано выше, также предельное расстояние обнаружения увеличится и при увеличении частоты и мощности зондирующих импульсов, излучаемых лазерными диодами.

ДЕТЕКТОР ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ НА КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Для дистанционного поиска биологической активности на космических объектах Солнечной системы рассматривается модифицированный детектор ультрафиолетового и инфракрасного излучений, который успешно эксплуатировался на спутниках типа *ТАТЬЯНА*, *КОМПАС-2*, *ЧИБИС-М*, *ВЕРНОВ*, а также эксплуатируется в полевых условиях на высокогорных станциях Тянь-Шаня и Арагаца. К детектору добавлены линза для увеличения чувствительности детектора к слабым световым излучениям, кристалл натрия йода для регистрации гамма квантов и источник света для возбуждения флуоресценции микроорганизмов. Пример применения детектора для изучения дневной и ночной атмосферы Земли приведен в работе [4]. Пример применения электроники детектора для регистрации гамма квантов и оптических излучений приведен в работе [5]. Пример исследования грозовых явлений с помощью этого детектора в горах Тянь-Шаня приведен в работе [6]. Полное описание детектора приведено в работе [7]. Детектор на ночной стороне орбиты имеет наилучшую чувствительность, начиная с одного фотоэлектрона, система автоматической регулировки усиления ФЭУ позволяет регистрировать оптическое излучение во всем диапазоне освещенностей планет Солнечной системы.

На рисунке показана структурная схема предлагаемого детектора.

Импульс флуоресцентного излучения микроорганизмов через линзу и светофильтр, попадает на фотокатод одного из ФЭУ. Второй ФЭУ регистрирует вспышке света вызванные квантами гамма излучения в кристалле натрия йода. Сигналы с анодов обоих ФЭУ поочередно считываются с помощью аналогового мультиплексора, частота коммутации которого значительно превосходит длительность вспышек света, что позволяет регистрировать осциллограмму вспышек света с каждого ФЭУ с помощью одного АЦП. Сигнал с АЦП в цифровом виде подается в микросхему программируемой логики. В микросхеме программируемой логики осуществляется восста-

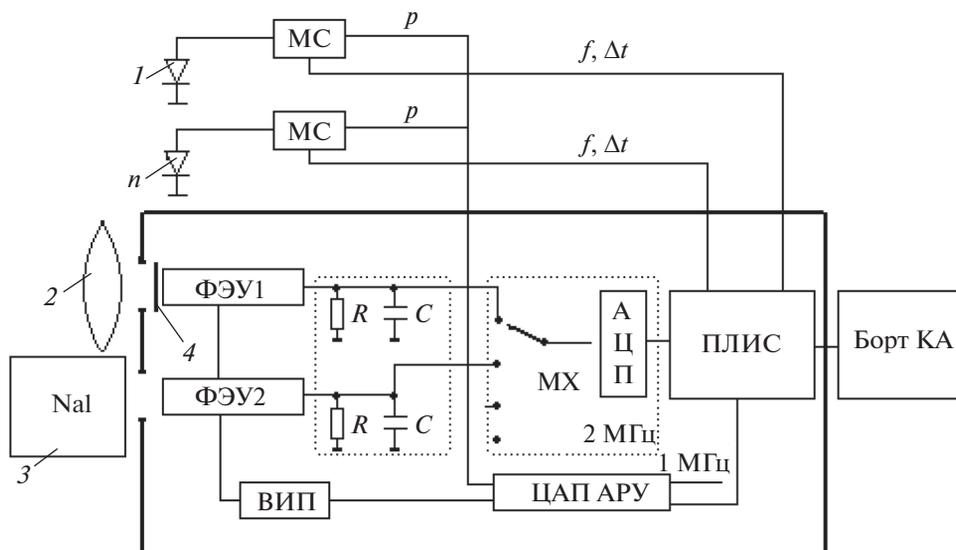


Рис. 1. 1, n – лазерные светодиоды с различными оптическими диапазонами излучения; 2 – кварцевая линза; 3 – кристалл натрия йода; 4 – светофильтр, МС – модуль согласования, ФЭУ – фотоэлектронные умножители; ВИП – высоковольтный источник питания ФЭУ; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь системы автоматической регулировки усиления ФЭУ; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПЛИС – микросхема программируемой логики, P – цепь управления мощностью излучения лазера; $f, \Delta t$ – цепь управления частотой и длительностью лазерных диодов.

новление осциллограмм сигналов поступающих с этих ФЭУ, предварительная их обработка в соответствии с научной задачей, и передача необходимой информации в компактном виде на борт космического аппарата. С помощью микросхемы программируемой логики также осуществляется управление мощностью, длительностью и частотой импульсов света лазерных диодов. Лазерные диоды можно включать либо все сразу, либо по одному, в режиме амплитудно-временной модуляции.

Основная обработка полезного сигнала происходит в логическом блоке детектора, с помощью которого осуществляется выбор научных задач и алгоритмов работы прибора.

ОБСУЖДЕНИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи детектора флуоресцентного излучения можно вести поиск колоний микроорганизмов непосредственно из космического пространства на площадях соизмеримых с размерами космических объектов. Вместе с тем на пролетных траекториях, проходящих на расстоянии в несколько сотен метров от космического тела, чувствительность детектора является достаточной, для регистрации одиночных микроорганизмов, находящиеся в апертуре обзора детектора.

В случае обнаружении микроорганизмов с помощью рассматриваемого детектора возможно

детальное изучение биологических свойств методами флуоресцентного анализа, не разрушающими микроорганизмы, нашедшими широкое применение в лабораторных исследованиях. Примеры применения методов флуоресцентного анализа для изучения микроорганизмов в земных условиях приведены в работах [8, 9].

Технические характеристики детектора не являются предельно возможными, например, площадь линзы Френеля можно увеличить в десятки раз, а мощность лазерных диодов до нескольких киловатт оптического излучения. В этом случае чувствительность детектора может повыситься на несколько порядков и, следовательно, вероятность обнаружения микроорганизмов за счет увеличения апертуры обзора и предельных расстояний до поверхности исследуемых космических тел.

Работа выполнена в соответствии с техническим заданием АО “НПО Лавочкина” на составную часть опытно-конструкторских работ “Разработка составной части технического предложения на комплекс научной аппаратуры для исследования спутников Марса и доставки образцов вещества Фобоса на Землю”.

Авторы выражают благодарность своим коллегам за помощь в работе, принявшим участие в обсуждении содержания этой статьи, замечания которых способствовали улучшению ее изложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berg I.A., Kockelkorn D., Ramos-Vera W.H. et al.* Autotrophic carbon fixation in archaea // *Nat. Rev. Microbiol.* 2010. Jun. 8.6. P. 447.
2. *Дешевая Е.А., Печеркин В.Я., Василяк Л.М. и др.* Выживание микроорганизмов на тестовых объектах при вакуумировании // *Авиакосмическая и экологическая медицина.* 2018. 2. С. 54–59.
3. *Björn L.O., Govindjee G.* The evolution of photosynthesis and chloroplasts // *Curr. Science.* 96/11. 2009. С. 1466–1474.
4. *Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Свертилов С.И. и др.* Глобальные техногенные свечения дневной и ночной атмосферы, обнаруженные на спутнике “Вернов” в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах оптического спектра // *ЖЭТФ.* 2018. Т. 154. Вып. 4(10). С. 787–801.
5. *Зелёный Л.М., Гуревич А.В., Климов С.И. и др.* Академический микроспутник “Чибис-М” // *Космич. исслед.* 2014. Т. 52. № 2. С. 93–105. (*Cosmic Research.* P. 87).
6. *Gurevich A.V., Garipov G.K., Almenova A.M. et al.* Simultaneous observation of lightning emission in different wave ranges of electromagnetic spectrum in Tien-Shan mountains // *Atmospheric Research.* 2018. V. 211. P. 73–84.
7. *Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Тулунов В.И. и др.* Детектор УФ на борту научно-образовательного микроспутника МГУ Университетский-Татьяна // *ПТЭ.* 1. 2006. С. 135–141.
8. *Antal T.K., Konyukhov I.V., Volgusheva A.A. et al.* A chlorophyll fluorescence induction and relaxation system for the continuous monitoring of photosynthetic capacity in photobioreactors // *Physiologia Plantarum.* 2018.
9. *Kuznetsov A.G., Pogosyan S.I., Konyukhov I.V. et al.* Possibilities of optical monitoring of phosphorus starvation in suspensions of microalga *Chlorella vulgaris* ip-pas c-1, chlorophyceae // *Moscow University Biological Sciences Bulletin.* 2018. V. 73. 3. P. 118–123.