

МОДУЛЬ ФИТОИНКУБАТОРА

С. В. Гонтарев

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: svg@ocean.ru*

В морских экологических экспедициях при определении скорости образования органического вещества в процессе фотосинтеза (величин первичной продукции) исследователи сталкиваются с необходимостью создать условия для экспозиции проб воды с фитопланктоном, отобранных на разных станциях и глубинах, на большом расстоянии друг от друга и с разными значениями температуры и освещенности. Используемые в настоящее время инкубаторы не позволяют задавать освещенность и температуру инкубирования индивидуально для каждой пробы. Несоответствие световых и температурных условий в точке отбора пробы и в эксперименте может приводить к ошибкам при оценке первичной продукции и определении световой зависимости. Корректное определение величины первичной продукции на разных глубинах зоны фотосинтеза с разными значениями температуры и освещенности требует создания условий для экспозиции проб воды с фитопланктоном, наиболее приближенных к естественным, что требует использования соответствующих инкубаторов. В морских экспедициях в зависимости от интенсивности забора проб и времени их экспонирования для проведения эксперимента может потребоваться инкубатор с различным количеством ячеек. В статье описывается разработанная конструкция модульного инкубатора, позволяющая быстро собирать инкубаторы на необходимое количество ячеек. Для проведения опытной эксплуатации и оптимизации конструкции изготовлен модуль инкубирования образцов. Модуль инкубирования позволяет выполнять инкубацию пробы воды при заданных времени экспозиции, температуре и освещенности индивидуально для каждой пробы.

Ключевые слова: фитоинкубатор, фотосинтез, экспозиции проб, универсальная ячейка, температура экспозиции, освещенность экспозиции

Введение

Для определения важнейшего экологического параметра водных экосистем – скорости образования органического вещества в ходе фотосинтеза или первичной продукции – необходимо выполнять экспериментальные работы с пробами воды, содержащими природный фитопланктон (Мошаров, Гонтарев, 2015). В настоящее время при измерении скорости образования органического вещества в процессе фотосинтеза или первичной продукции, наиболее часто используют упрощенные инкубаторы. При этом пробы воды с фитопланктоном, отобранные с различных глубин, инкубируются при постоянных условиях температуры и освещенности, значительно отличающихся от тех, при которых происходил отбор проб (Руоппа, Хейнонен, 2006). Корректное определение величин первичной продукции требует создания условий

для экспозиции проб воды с фитопланктоном, наиболее приближенных к естественным условиям.

Известны конструкции палубных инкубаторов, в которых экспонирование проб производится на палубе судна. Предполагается, что условия освещенности и температура соответствуют освещенности и температуре в зоне забора пробы (Корсак, Сорокин, 1980; Мошаров и др., 2009; Ведерников и др., 2002). В общем случае освещенность на палубе судна не может соответствовать освещенности в зоне забора пробы под водой. Аналогичная ситуация с несоответствием температуры. При быстрых перемещениях судна в процессе проведения исследований погодные условия в различных регионах могут сильно различаться. Палубные инкубаторы не позволяют задавать различные условия экспонирования для различных образцов проб.

В подходе, основанном на экспонировании пробы под водой на глубине забора пробы, обеспечивается соответствие условий экспонирования (Винберг, 1960). При таком способе экспонирования также отсутствует возможность задавать различные режимы экспонирования проб. Метод не применим для работ на непрерывно перемещающемся судне.

Наиболее широкими возможностями в плане задания параметров экспонирования обладают инкубаторы для культивирования клеток и микроорганизмов (Инкубаторы, 2025). Такой тип инкубаторов оптимизируется для максимального выхода продукта инкубации. В них допускается использование измененной газовой среды, импульсной засветки и применение источников света с произвольным спектром. Однако для получения достоверных результатов измерений температура и освещенность в инкубаторе должны максимально повторять условия внешней среды. Засветка не должна содержать пульсаций света и иметь спектр максимально близкий к естественному. Использование для проведения измерений инкубаторов такого типа может давать большие ошибки.

По результатам обзора литературы найден рекомендованный ICES – Международным Советом морских исследований – стандартный инкубатор. Он рекомендован для применения в качестве единого средства во всех исследованиях по определению первичной продукции. Описание инкубатора представлено на сайте производителя. (ICES Incubator, 2025) Данный инкубатор используется в программе мониторинга Балтийского моря (Руоппа, Хейнонен, 2006). Используемые в настоящее время инкубаторы имеют существенные ограничения по контролю параметров инкубации – например, ICES Incubator, HELCOM). Инкубатор представляют собой моноблок. Имитация световых условий на различных глубинах водной толщи отбора проб в инкубаторе осуществляется с помощью единого для всех проб источника света с использованием люминесцентных ламп и индивидуального затенения каждой пробы нейтральными светофильтрами. Инкубатор не защищен от воздействия внешних источников света. Недостатком данного инкубатора является неравномерный световой поток в ячейках с исследуемыми пробами фитопланктона. Неравномерность светового поля при этом частично компенсируется вращением образцов. Различные уровни освещенности для отдельных проб устанавливаются с помощью нейтральных светофильтров

с определенными дискретными градациями светопропускания, что не позволяет точно воспроизвести уровень освещенности на разных горизонтах отбора проб. Недостатком инкубатора также является отсутствие возможности индивидуально задавать температуру исследуемых проб воды с фитопланктоном, что существенно сужает точность определения первичной продукции. Система охлаждения исследуемых проб в рассматриваемом инкубаторе может поддерживать только единый уровень температуры для всего инкубатора – либо за счет прокачки воды из верхнего горизонта, в случае экспериментов на борту исследовательского судна, либо за счет использования специального охлаждающего оборудования с циркуляцией воды через экспериментальный инкубатор с пробами. Единая для всех проб температура инкубирования приводит к экспонированию проб при температуре воды, отличной от природной (Мошаров, Гонтарев, 2015). Основным недостаток существующих инкубаторов при их использовании в полевых экспедиционных условиях для определения скорости фотосинтеза фитопланктона заключается в несоответствии световых и температурных условий в точке отбора пробы и в эксперименте, что может приводить к значительным ошибкам при оценке первичной продукции и определении световых зависимостей (Мошаров, Гонтарев, 2015). Для получения более корректной информации о распределении первичной продукции в зоне фотосинтеза необходимо каждую пробу инкубировать в точном соответствии с температурными и световыми условиями в точке отбора пробы, так как существует длительная адаптация фитопланктона к температурным условиям и освещенности на разной глубине.

Целью работы является разработка инкубатора с индивидуальными условиями экспонирования по температуре и освещенности для каждого образца. Должна быть обеспечена возможность постоянной модернизации инкубатора в соответствии с вновь возникающими потребностями исследований. При этом модернизация должна выполняться с минимальными затратами путем разработки новых модулей без переделки конструкции инкубатора в целом. Инкубатор должен обеспечивать быструю сборку измерительной установки из готовых модулей с необходимым количеством ячеек для экспонирования образцов в лабораторных и полевых условиях.

Область применения инкубатора

Для экспонирования проб воды с фитопланктоном, адаптированным к световым условиям разных глубин, разработана конструкция модульного инкубатора, позволяющая оперативно комплектовать фитоинкубатор необходимым количеством ячеек, в которых с требуемой точностью поддерживаются наиболее значимые факторы, определяющие уровень и динамику первичной продукции и соответствие экспериментальных условий природным.

Применение инкубатора с ячейками, позволяющими задать условия экспонирования индивидуально для каждого образца, позволяет повысить точность и прогностичность полученных результатов. Повышение точности измерений возможно

в международных экологических и мониторинговых программах (HELCOM, SCOR и др.), основанных на инкубации проб воды при искусственном освещении в контролируемых температурных условиях. Повышение точности также возможно в оценке первичной продукции, использующейся при проведении работ по контролю качества поверхностных вод суши по гидробиологическим показателям и регламентирующийся документом «Р 52.24.309-2004 Рекомендации. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши на сети Росгидромета». Повышение точности измерений связано с высокой чувствительностью первичной продукции к условиям внешней среды и наличию загрязнений.

В процессе экспедиционных исследований возникает потребность одновременно экспонирования большого количества проб, отобранных на разных станциях и глубинах, на большом расстоянии друг от друга. При этом потребность в количестве ячеек инкубатора может существенно различаться для различных видов исследований. Например, при проведении экотоксикологических исследований устойчивости к загрязняющим веществам требуется инкубация большого количества проб при индивидуально заданных для каждого образца условиях температуры и освещенности. Необходимое количество ячеек инкубатора зависит от интенсивности получения проб, времени их экспозиции и плана проведения эксперимента в каждом конкретном случае. В условиях проведения современных комплексных экологических исследований, при быстром переходе судна из одного географического района в другой с отличающимися физико-химическими условиями, возникает необходимость одновременной инкубации большого количества проб при различных значениях температуры и освещенности. При этом хранение проб недопустимо в связи с быстрыми биохимическими изменениями, происходящими в условиях ограниченного объема исследуемой воды.

Устройство модульного инкубатора

По мере развития элементной базы, используемой при разработке инкубаторов новых типов, появляются возможности для проведения исследований с использованием новых режимов инкубирования. В целях сокращения количества разнотипных инкубаторов и затрат на переделку существующих инкубаторов, разработана конструкция модульного инкубатора с универсальным модулем инкубирования образцов, содержащим датчики и исполнительные устройства, и с единым модулем управляющей микропроцессорной системы, осуществляющей все функции регулирования. Разработка является дальнейшим развитием исследований, описанных в (Мошаров и др., 2015). Модули инкубирования, представленные в статье (Мошаров и др., 2015) на рисунках 1 и 2, имеют индивидуальную систему регулирования освещенности, температуры и времени экспозиции в каждой ячейке. Изменения конструкции инкубатора в этом случае требуют значительного объема работ по усовершенствованию системы управления каждой ячейкой. В предлагаемом в данной статье подходе все функции регулирования вынесены в единый модуль микропроцессорной системы

управления. Модуль инкубирования является полностью пассивным устройством и содержит только датчик температуры и исполнительные устройства – электромагнитный клапан, нагреватель и плату светодиодной подсветки. Такое разделение функций позволяет осуществлять модернизацию алгоритмов работы инкубатора путем изменения программного обеспечения микропроцессорной системы. Снижаются затраты на модернизацию инкубатора в целом. Структура модульного инкубатора представлена на рисунке 1.

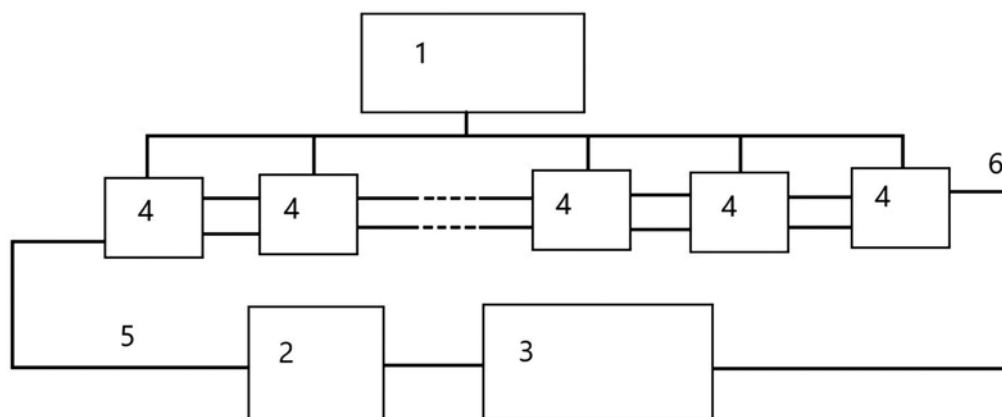


Рис. 1 – Схема сборки инкубатора на базе универсальных модулей: 1 – модуль микропроцессорной системы управления, 2 – насос, 3 – холодильная станция, 4 – модуль инкубирования, 5 – магистраль холодной воды, 6 – магистраль отработанной воды

Инкубатор собирается путем присоединения необходимого количества модулей инкубирования 4 к единому модулю микропроцессорной системы управления 1. Модуль микропроцессорной системы управления 1 соединяется с каждым модулем инкубирования 4 отдельным электрическим кабелем. Он позволяет проводить исследование образцов при заданных времени экспонирования, уровнях освещенности и температурных условиях индивидуально для каждого модуля инкубирования 4. Возможна инкубация с нагревом или охлаждением относительно температуры внешней среды. Модули инкубирования 4 объединяются в единый инкубатор путем последовательного соединения магистралей подачи холодной воды 5 и магистралей отработанной воды 6. Магистраль отработанной воды 6 подает воду на общую холодильную станцию 3. С выхода холодильной станции 3 охлажденная вода подается насосом 2 в магистраль холодной воды 5. В случае необходимости инкубаторы могут объединяться в несколько линеек с индивидуальной холодильной станцией для каждой линейки.

Устройство модуля инкубирования

Для опытной эксплуатации и оптимизации конструкции разработан и изготовлен модуль инкубирования. Модуль инкубирования, изображенный на рисунке 2, отличается от ячейки фитоинкубатора, представленной в (Мошаров и др., 2015)

измененной конструкцией. Опыт эксплуатации ячейки показал наличие высокого теплового сопротивления между устройствами нагрева/охлаждения и инкубируемым образцом, что требует увеличенного времени для выравнивания температуры. В новой конструкции модуля объем для инкубирования образца заполняется водой. Это позволяет снизить тепловое сопротивление и ускорить процесс выравнивания температуры. Внешний вид модуля и его конструкция показаны на рисунках 2 и 3 соответственно.

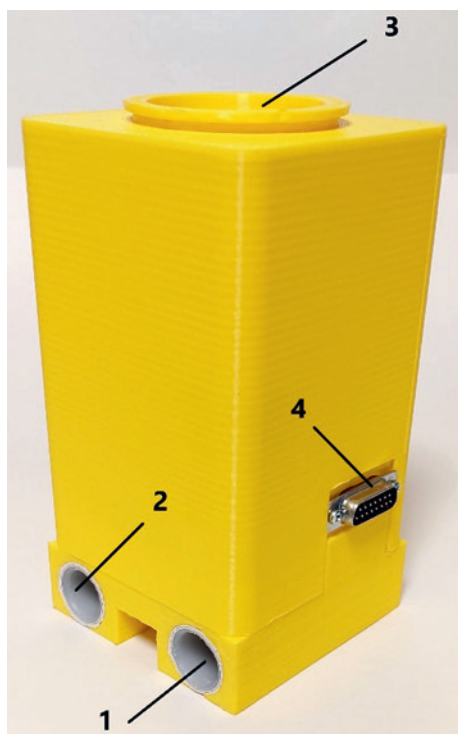


Рис. 2 – Внешний вид модуля:

- 1 – магистраль подачи холодной воды,
- 2 – магистраль слива отработанной воды,
- 3 – крышка камеры инкубирования,
- 4 – разъем для подключения управляющих сигналов

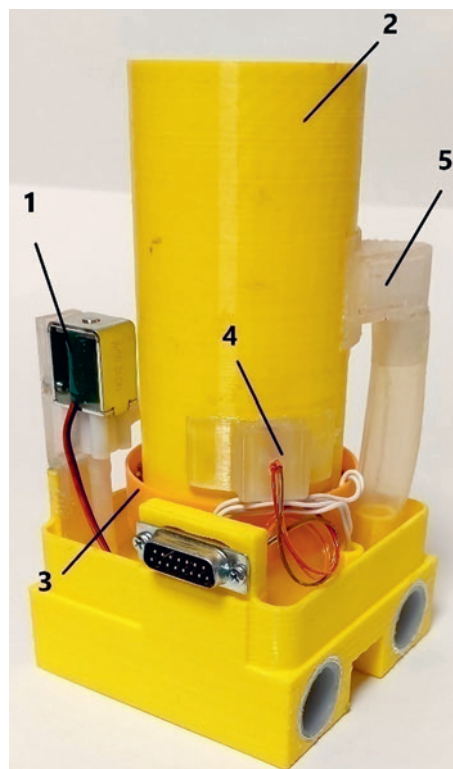


Рис. 3 – Конструкция модуля:

- 1 – клапан подачи холодной воды,
- 2 – объем для инкубирования образца,
- 3 – нагреватель, 4 – датчик температуры,
- 5 – слив отработанной воды

В зависимости от заданных параметров используется нагрев или охлаждение камеры инкубирования. Нагрев камеры инкубирования производится резистивным нагревателем. Охлаждение камеры осуществляется холодной водой, подаваемой от общей станции-холодильника через магистраль холодной воды. Необходимая степень охлаждения достигается путем контроля подачи холодной воды в камеру инкубирования модуля. Объем охлаждающей воды контролируется клапаном холодной воды. Контроль температуры инкубируемой среды осуществляется с помощью датчика температуры, расположенного в модуле инкубирования. Подсветка инкубируемого образца выполняется матрицей светодиодов снизу через прозрачное окно.

Основные характеристики модуля инкубирования

1. Габариты модуля инкубирования – 100×100×170 мм.
2. Размеры камеры инкубирования образцов – диаметр 60 мм, высота 130 мм.
3. Мощность светодиодной подсветки – 3 Ватта.
4. Световой поток регулируется в диапазоне освещенности от 0 до 1500 мкмоль фотонов/м² в сек и стабилизируется для каждого модуля инкубирования.
5. Стабильность спектрального состава светового потока в диапазоне от 400 до 700 нм обеспечивается во всем диапазоне регулирования освещенности.
6. Мощность резистивного нагревателя – 22 Ватта.
7. Температура внутренней камеры модуля инкубирования задается в диапазоне от 1 °С до +30 °С (в том числе нагрев до температуры выше комнатной) для каждой пробы отдельно.
8. Зона инкубирования защищена от воздействия посторонних источников света.

Инкубатор в целом проектируется на напряжение питания 12 Вольт, что позволит использовать его в автономном полевом варианте, а также обеспечит электробезопасность при работе с морской водой. Возможна круглосуточная непрерывная работа фитоинкубатора.

Характеристики модулей инкубирования и микропроцессорного модуля управления являются предварительными. Диапазоны изменения светового потока и спектрального состава подсветки выбираются исходя из задач эксперимента и могут отличаться от указанных выше. Они будут уточняться и дополняться в процессе опытной эксплуатации прибора, оптимизации его конструкции и режимов экспонирования образцов. Преимуществом предложенной конструкции модуля инкубирования является возможность изменения спектра излучения с минимальной переделкой модуля. Перенастройка спектра осуществляется путем замены единственной платы со светодиодами. Конструкция модуля в целом не изменяется.

В процессе опытной эксплуатации планируется проведение исследований воздействия на первичную продукцию различных видов модуляции светового потока. В процессе оптимизации конструкции планируется проведение работ по повышению воспроизводимости результатов измерений.

Разработанный модульный инкубатор позволяет оперативно собирать измерительные установки с необходимым для проведения экспериментов количеством ячеек (модулей инкубирования). После проведения экспериментов ячейки могут повторно использоваться в других экспериментах. Преимуществом модульной схемы построения инкубатора является возможность пополнения инкубатора новыми модулями инкубирования с расширенными возможностями по мере их разработки без переделки всей конструкции инкубатора в целом.

Заключение

Разработанная модульная конструкция инкубатора позволит проводить экспонирование образцов с индивидуальными условиями по температуре, освещенности и длительности для каждой пробы в лабораторных и полевых условиях. Модульный фитоинкубатор позволит оперативно собирать измерительные установки с необходимым для проведения исследований количеством ячеек – модулей инкубирования.

Преимуществом модульного инкубатора является возможность пополнения инкубаторов новыми модулями с улучшенными характеристиками и удаления устаревших без переделки всего инкубатора в целом.

Изготовленный модуль инкубирования образцов позволяет реализовывать экспонирование образцов световым потоком от 0 до 1500 мкмоль фотонов/м² с различным спектром в диапазоне от 400 до 700 нм и различными видами модуляции светового потока. В целях сравнения с результатами, полученными ранее на других установках, планируется проведение исследований зависимости первичной продукции от режимов засветки проб с различными видами модуляции светового потока. Также планируются исследования, направленные на повышение воспроизводимости результатов измерения первичной продукции.

В дальнейшем планируется разработка специализированных модулей для проведения исследований с уникальными режимами экспонирования.

Список литературы

1. Ведерников В. И., Гагарин В. И., Демидов А. Б., Буренков В. И., Стунжас П. А. Распределение первичной продукции и хлорофилла в субтропических и тропических водах Атлантического океана осенью 2002 г. // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 3. С. 418–431.
2. Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов / Г. Г. Винберг; Институт биологии академии наук БССР. Минск: Издательство академии наук БССР, 1960. 329 с.
3. Инкубаторы // <https://ptfkorpus.ru/catalogue/oborudovanie-dlya-biologii/inkubatory/> (дата обращения: 15.03.2025).
4. Корсак М. Н., Сорокин Ю. И. Первичная продукция и особенности ее образования // *Экосистемы пелагиали Перуанского района*. М.: Наука, 1980. С. 81–94.
5. Марья Руоппа / Marja Ruoppa и Пертти Хейнонен. В кн.: Биологические методы исследования качества воды в Финляндии: Справочное издание по охране окружающей среды / Pertti Heinonen (ред.). Хельсинки: EDITA (Edita Publishing Oy), 2006. <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/5c151f95-9331-4b4e-b6d3-fa4f2d8472a2/content> (дата обращения: 20.10.2024).
6. Мошаров С. А., Гонтарев С. В. Фитоинкубатор для определения первичной продукции фитопланктона с индивидуальными настройками температуры и освещенности // *Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2015)*. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 2015. С. 319–322. http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/%D0%9C%D0%A1%D0%9E%D0%98_2015-2.pdf (дата обращения: 20.10.2024).

7. Мошаров С. А., Серова Е. М., Корсак М. Н., Даллакян Г. А. Особенности токсического влияния меди на различные фитопланктонные сообщества Балтийского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Биология. 2009. № 3. С. 34–39.
8. Мошаров С. А., Гонтарев С. В., Корсак М. Н. Новый фитоинкубатор с регулированием температуры и освещенности для мониторинга экологических параметров водных экосистем // Безопасность в техносфере. 2015. № 4 (июль–август). С. 3–9.
9. ICES Incubator https://www.hydrobios.de/en/product?product_id=46. (дата обращения: 15.03.2025).

Статья поступила в редакцию 28.10.2024, одобрена к печати 05.06.2025.

Для цитирования: Гонтарев С. В. Модуль фитоинкубатора // Океанологические исследования. 2025. № 53 (3). С. 157–166. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(3\).9](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).9).

THE PHYTOINCUBATOR MODULE

S. V. Gontarev

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: svg@ocean.ru*

In marine ecological expeditions, when determining the rate of formation of organic matter in the process of photosynthesis (the values of primary production), researchers are faced with the need to create conditions for the exposure of water samples with phytoplankton, collected at different stations and depths, at a large distance from each other and with different values of temperature and illumination. The incubators currently in use do not allow for setting illumination and incubation temperature individually for each sample. Mismatches in light and temperature conditions at the sampling point and in the experiment may lead to errors in assessing primary production and determining light dependence. Correct determination of the magnitude of primary production at different depths of the photosynthesis zone with different values of temperature and illumination requires the creation of conditions for the exposure of water samples with phytoplankton that are as close as possible to natural ones, which requires the use of appropriate incubators. In marine expeditions, depending on the intensity of sampling and the time of their exposure, an incubator with a different number of cells may be required to conduct an experiment. The article describes the developed design of a modular incubator, which allows for quick assembly of incubators for the required number of cells. A sample incubation module was manufactured for trial operation and design optimization. The incubation module allows for incubation of a water sample at specified exposure time, temperature and illumination individually in each cell.

Keywords: phytoincubator, photosynthesis, sample exposures, universal cell, exposure temperature, exposure illumination

References

1. *ICES Incubator*. https://www.hydrobios.de/en/product?product_id=46, (date of access: 15.03.2025).
2. *Incubatory*. <https://ptfkorpus.ru/catalogue/oborudovanie-dlya-biologii/inkubatory/> (date of access: 15.03.2025).
3. Korsak, M. N. and Yu. I. Sorokin, 1980: Primary production and features of its formation. *Ecosystems of the pelagic zone of the Peruvian region*. Moscow, Nauka, 81–94.
4. Marja Ruoppa and Pertti Heinonen (eds.), 2006: Reference publication on Environmental Protection “*Biological methods of water quality research in Finland*” Place and year of publication EDITA (Edita Publishing Oy) – multidisciplinary company, Helsinki, <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/5c151f95-9331-4b4e-b6d3-fa4f2d8472a2/content> (date of application: 20.10.2024).
5. Mosharov, S. A. and S. V. Gontarev, 2015: Phytoincubator for determining the primary production of phytoplankton with individual temperature and illumination settings. *Modern methods and means of oceanological research (MSOI-2015). Materials of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference*. Moscow, 319–322, http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/%D0%9C%D0%A1%D0%9E%D0%98_2015-2.pdf (date of application: 20.10.2024).
6. Mosharov, S. A., E. M. Serova, M. N. Korsak, and G. A. Dallakyan, 2009: Features of the toxic effect of copper on various phytoplankton communities of the Baltic Sea. *Vestn. Moscow University. Series: Biology*, **3**, 34–39.
7. Mosharov, S. A., S. V. Gontarev, and M. N. Korsak, 2015: New phytoincubator with temperature and illumination control for monitoring environmental parameters of aquatic ecosystems. *Safety in the technosphere*, **4** (July–August), 3–9.
8. Vedernikov, V. I., V. I. Gagarin, A. B. Demidov, V. I. Burenkov, and P. A. Stunzhas, 2007: Distribution of primary production and chlorophyll in subtropical and tropical waters of the Atlantic Ocean in autumn 2002. *Oceanology*, **47** (3), 418–431.
9. Vinberg, G. G., 1960: *Primary production of water bodies*. G. G. Vinberg; Institute of Biology of the Academy of Sciences of the BSSR. Minsk, Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR, 329 p.

Submitted 28.10.2024, accepted 05.06.2025.

For citation: Gontarev, S. V., 2025: The phytoincubator module. *Journal of Oceanological Research*, **53** (3), 157–166, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(3\).9](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).9).