

*На правах рукописи*

ПОНОМАРЕВА

Анна Андреевна

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ФИТОПЛАНКТОНА В БУХТЕ ПАРИС  
(ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

03.02.10 – гидробиология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Владивосток – 2017

Работа выполнена в Лаборатории морской микробиоты Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Национальный научный центр морской биологии» Дальневосточного отделения Российской академии наук

**Научный руководитель**

**Шевченко Ольга Геннадьевна**

кандидат биологических наук, доцент

**Официальные оппоненты:**

**Силкин Владимир Арсентьевич**

доктор биологических наук, старший научный сотрудник, зав. Лабораторией экологии, Южное отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

**Медведева Любовь Анатольевна**

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Лаборатории пресноводной гидробиологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии» ДВО РАН

**Ведущая организация**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского» РАН

Защита состоится 15 июня 2017 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 005.008.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Национальный научный центр морской биологии» Дальневосточного отделения РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17, факс (423)2310900.

Электронный адрес: [inmarbio@mail.primorye.ru](mailto:inmarbio@mail.primorye.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Национальный научный центр морской биологии» Дальневосточного отделения Российской академии наук: <http://www.wimb.dvo.ru/misc/dissertations/index.php/sovet-d-005-008-02/32-ponomareva-anna-andreevna>

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат биологических наук



Костина Елена Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Состав и показатели развития фитопланктона широко используются для оценки степени антропогенного воздействия на акваторию и могут служить индикатором состояния экосистемы благодаря способности микроводорослей быстро реагировать на изменения, происходящие в водной среде (Cloern, Jassby, 2010). Детальная характеристика особенно актуальна для прибрежных вод, используемых как особо охраняемые акватории, нерестилища или участки развития марикультуры. К такой акватории относится б. Парис у западного побережья п-ва Житкова, о-ва Русский, где расположена База исследования морских млекопитающих (БИММ) «Приморского океанариума» – филиала Национального научного центра морской биологии Дальневосточного отделения Российской академии наук. На расстоянии 30 м от берега в б. Парис размещены несколько открытых вольеров с белухами *Delphinapterus leucas* и ларгами *Phoca larga*. С 2013 г. в бухте проводится мониторинг видового состава и динамики количественных характеристик планктонных микроводорослей, направленный на изучение влияния содержания морских млекопитающих на окружающую среду и, с другой стороны, на выяснение уровня воздействия сообщества микроводорослей на животных.

Одним из актуальных направлений мониторинга микроводорослей является наблюдение за динамикой токсичных видов. В научной литературе накоплены многочисленные сведения о случаях массовой гибели морских млекопитающих, птиц, рыб и беспозвоночных в результате всплеск плотности токсичных видов фитопланктона (Geraci et al., 1989; Anderson, White, 1992; Landsberg, 2002; Lefebvre et al., 2016 и др.). Массовые развития токсичных водорослей являются обычным природным явлением, однако в последние десятилетия на фоне активного антропогенного воздействия на прибрежные акватории Мирового океана и глобального изменения климата их размеры и частота достигли катастрофических масштабов (Smayda, 1990; Johansson, Granéli, 1999).

**Степень разработанности.** До недавнего времени прибрежные воды о-ва Русский были недоступны для научных исследований, так как большая их часть находилась в ведомстве Министерства обороны Российской Федерации. Ситуация изменилась кардинально после принятия решения о строительстве Научно-образовательного

комплекса «Приморский Океанариум» ДВО РАН на полуострове Житкова (о-в Русский).

Северное побережье о-ва Русский омывают воды прол. Босфор Восточный, посредством которого сообщаются Амурский (западное побережье о-ва Русский) и Уссурийский (восточное побережье острова) заливы. Первые исследования бухт, вдающихся в берега прол. Босфор Восточный, относятся к 30-м годам прошлого столетия. Были изучены видовой состав и сезонная динамика количественных показателей микроводорослей в б. Патрокл (Киселев, 1934, 1935). В б. Золотой Рог акцент в исследованиях сообщества микроводорослей в 2000-х годах был сделан на изучение качественного и количественного состава фитопланктона в условиях антропогенного воздействия: эвтрофикации, термального загрязнения и влияния сточных вод (Stonik, Orlova, 2002; Бегун и др., 2003; Бегун, 2004). В б. Парис проводили исследования, посвященные изучению отдельных родов фитопланктона (Шевченко, Айздайчер, 2014).

Исследованию планктонных микроводорослей Уссурийского залива, который является крупнейшим на акватории зал. Петра Великого, было посвящено несколько работ. По итогам изучения фитопланктона в апреле–сентябре 1983 г. в заливе идентифицировано 80 видов микроводорослей и показаны пространственно-временные изменения весенне-осеннего фитоценоза (Селина, 1988). В мае 2001–мае 2002 гг. изучены качественный и количественный состав фитопланктона в б. Сухопутная, отмечено 119 таксонов микроводорослей (Бегун, 2004).

Наиболее изученной акваторией является Амурский залив, исследованию фитопланктона которого посвящено свыше 30 публикаций. Среди них есть работы по изучению сообщества в целом (Коновалова, 1972; Паутова, Коновалова, 1982; Паутова, 1984, 1990; Паутова, Силкин, 2000; Бегун и др., 2004; Шулькин и др., 2013; и др.), отдельных родов микроводорослей (Стоник, 1994; Стоник, Орлова, 1998а; Орлова, Шевченко, 2002; Шевченко и др., 2004; Stonik, 2007; Selina et al., 2008; Шевченко, Орлова, 2010; Стоник и др., 2012 и др.), проблем эвтрофирования и «цветения» воды (Симакова и др., 1990; Селина и др., 1992; Стоник, Орлова, 1998б). Результаты многолетних исследований флоры микроводорослей Амурского залива обобщены в работе Т.Ю. Орловой с соавторами (Орлова и др., 2009).

Исследование фитопланктона в б. Парис проводится впервые; необходимость мониторинга микроводорослей обусловлена размещением Базы изучения морских млекопитающих (БИММ) «Приморского океанариума» – филиала ННЦМБ ДВО РАН и непосредственно комплекса зданий учреждения на побережье бухты. Начало мониторинговых наблюдений практически совпадает с размещением первых морских животных на акватории и запуском в эксплуатацию океанариума.

**Цель и задачи работы.** Цель данной работы – исследовать структуру и динамику фитопланктона в прибрежных водах о-ва Русский в 2013–2015 гг. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать таксономический состав фитопланктона бухты Парис и Уссурийского залива;
2. Изучить сезонную и межгодовую динамику плотности и биомассы микроводорослей и основных гидрохимических характеристик в районе содержания морских млекопитающих и на акваториях, не подверженных их влиянию;
3. Исследовать видовой состав и степень количественного развития видов рода *Skeletonema* – основных доминантов в период исследования;
4. Изучить видовой состав и количественные характеристики потенциально токсичных видов фитопланктона в бухте Парис и Уссурийском заливе;
5. Оценить воздействие содержания морских млекопитающих на окружающую среду.

**Научная новизна.** Впервые проведен многолетний мониторинг планктонного сообщества микроводорослей, в том числе потенциально токсичных видов, и гидрохимических параметров среды в районе содержания холодноводных морских млекопитающих; показано отсутствие влияния содержания морских млекопитающих на исследованную акваторию.

Обнаружены 2 новых для морских вод России вида рода *Skeletonema*: *S. dohrnii* и *S. marinoi*. Для всех видов рода *Skeletonema*, идентифицированных в районе исследования, представлено морфологическое описание, данные по количественным характеристикам, дополнены сведения по экологии видов, приведены таблицы микрофотографий.

**Теоретическая и практическая значимость.** Мониторинг фитопланктона был начат практически одновременно с началом содержания морских млекопитающих в садках на открытой воде в б. Парис. Благодаря способности микроводорослей быстро

реагировать на изменения, происходящие в водной среде, изменение состава и количественных параметров фитопланктона могут быть показателями состояния экосистемы. В то же время, необходим контроль за развитием токсичных и вредоносных видов микроводорослей для своевременного принятия мер по безопасному содержанию морских животных.

Сведения о видовом составе и особенностях развития фитоценоза на акватории исследования лягут в основу базы данных, необходимой для дальнейшего сравнения и последующей оценки состояния микроводорослей прибрежных вод б. Парис и прилегающих акваторий в районе океанариума.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Методология и методы исследования представлены в главе 3. При проведении сбора материала использовали стандартные гидробиологические методы. Для исследования морфологии доминирующих видов применяли культуральный и микроскопические методы. Анализ полученных данных проводили с использованием стандартных математических методов, применяемых для биологических объектов.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Виды *Skeletonema dohrnii* и *S. marinoi* – новые для морских вод России.
2. Содержание млекопитающих не оказывало существенного влияния на количественные и качественные показатели фитопланктон и гидрохимические параметры среды б. Парис в период исследования.
3. Полученные данные послужат основой для дальнейшего мониторинга многолетних изменений сообщества микроводорослей в б. Парис и прилегающей акватории.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечена большим объемом обработанного и проанализированного материала (384 пробы) и применением широкого спектра методов исследования (сканирующей и трансмиссионной электронной микроскопии, лабораторного культивирования, математического анализа). Представленные в работе сведения подтверждены иллюстративным материалом, таблицами, микрофотографиями.

**Личный вклад автора.** Сбор и обработка проб фитопланктона; выделение клоновых культур и культивирование микроводорослей; идентификация клеток с применением методов электронной микроскопии; графическое представление данных;

анализ, обобщение, сопоставление полученных сведений с данными, представленными в литературе.

**Апробация работы.** Материалы диссертации представлены на международной конференции «Экология окраинных морей и их бассейнов», г. Владивосток (2013); на международной конференции «Уникальные морские экосистемы: современные технологии изучения и сохранения для будущих поколений», Владивосток (2016); на ежегодной конференции Института биологии моря им. А.В. Жирмунского ДВО РАН (2016).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 3 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 171 странице, состоит из введения, 4 глав, заключения, выводов, списка литературы из 98 отечественных и 91 иностранного источника. Включает 23 рисунка, 3 таблицы и 10 приложений.

**Благодарности.** Выражаю огромную благодарность своему научному руководителю к.б.н. Ольге Геннадьевне Шевченко за всестороннюю помощь, советы и поддержку на всех этапах работы. Особая благодарность научному консультанту к.б.н. Татьяне Юрьевне Орловой за ценные наставления и критические замечания, д.б.н. Алексею Викторовичу Чернышеву за критические замечания и предложения. Огромная благодарность коллективу Лаборатории микробиоты ННЦМБ ДВО РАН, а также Сергею Ивановичу Масленникову за ценные советы и консультации по возникающим вопросам. Сердечно благодарю Владимира Марковича Шулькина, заведующего лабораторией геохимии ТИГ ДВО РАН, за помощь и консультации в ходе подготовки и проведения работы. Выражаю признательность Денису Владимировичу Фомину за обучение и помощь в освоении методов электронной микроскопии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-04-04838.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Обзор данных литературы по проблематике исследования**

#### **1.1 Степень изученности фитопланктона бухты Парис и прилегающих акваторий**

Приведены сведения о степени изученности исследуемой акватории, проведены сравнения с изученными ранее прилегающими акваториями и данными изучения заливов и бухт зал. Петра Великого.

#### **1.2 Морские млекопитающие и фитопланктон**

Приведены сведения об изучении влияния микроводорослей на морских млекопитающих, а также исследовании влияния их жизнедеятельности на окружающую среду.

### **Глава 2. Характеристика района исследования**

Приведены сведения о географическом положении, климатических особенностях, температуре, солености и течениях зал. Петра великого, в частности прол. Босфор Восточный, Уссурийского залива и б. Парис.

### **Глава 3. Материалы и методы исследования**

#### **3.1 Методы сбора и обработки материала.**

В основу работы легли количественные сборы фитопланктона, выполненные с декабря 2012 г. по ноябрь 2015 г. включительно в б. Парис на станции в районе садков с морскими млекопитающими (станция в районе садков); в январе–ноябре 2013 г., июле–октябре 2015 г. и феврале–декабре 2015 г. на контрольной станции; в июле–октябре 2014 г., мае–октябре 2015 г. на станции в Уссурийском заливе в районе водозабора для нужд «Приморского океанариума» – филиала ННЦМБ ДВО РАН (станция водозабор) (рис. 1). Всего было собрано и обработано 384 пробы. Также были изучены 113 проб фитопланктона, сборы которых были выполнены в феврале, апреле, мае 2007 и в сентябре 2008 гг. в прибрежной зоне восточной части о-ва Русский в прол. Босфор Восточный и в Уссурийском заливе сотрудниками Лаборатории экологии шельфовых сообществ ИБМ ДВО РАН на НИС «Ларга».

Всего изучено 497 проб фитопланктона.

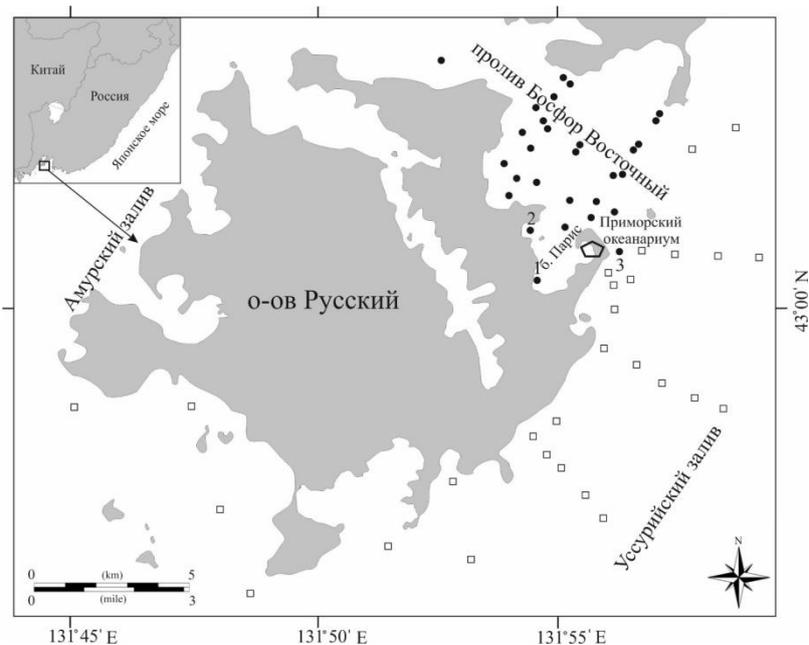


Рисунок 1 – Карта-схема расположения станций у побережья о-ва Русский. 1 – станция в районе садков, 2 – контрольная станция, 3 – станция водозабора. Кругами обозначены станции в прол. Босфор Восточный, квадратами – в Уссурийском заливе, выполненные в 2007 и 2008 гг.

Пробы фитопланктона на мониторинговых станциях отбирали два раза в месяц 5-ти литровым батометром Нискина с горизонтов 0,5, 2 и 5 м. На контрольной станции и в районе водозабора начало отбора проб было приурочено к открытию навигационного сезона. Пробы 2007 и 2008 гг. отбирали только с горизонта 0,5 м 5-ти литровым батометром Нискина.

Один литр пробы фиксировали раствором Утермеля до бледно-желтого цвета и концентрировали методом осаждения (Utermöhl, 1958) или методом обратной фильтрации через поликарбонатные мембранные фильтры Nucleopore с диаметром пор 2 мкм (Суханова, 1983).

### 3.2. Гидрохимические и гидрологические параметры среды.

На станции в районе садков одновременно с отбором проб микроводорослей проводили сбор материала для гидрохимических исследований. В 2013 г. сбор проб для гидрохимических исследований также проводили на контрольной станции. Пробы отбирали в предварительно отмытые полиэтиленовые емкости с глубины 0,3–0,5 м. Содержание и концентрацию биогенных элементов (растворенный кремний, нитраты,

нитриты, фосфаты и органические формы фосфора) определяли в Лаборатории геохимии Тихоокеанского института географии ДВО РАН.

### **3.3 Методы исследования фитопланктона**

Видовую идентификацию микроводорослей проводили с использованием светового микроскопа проходящего света Olympus BX 41. Определение плотности клеток нанопланктона проводили в камере типа Нажжота объемом 0,05 мл; микропланктон подсчитывали в камере «Сэдвик-Рафтер» (Sedgewick Rafter Counting cells) объемом 1 мл, с учетом минимальной репрезентативной выборки просчитанного числа клеток (Кольцова и др., 1971). Биомассу микроводорослей оценивали объемным методом, используя оригинальные и литературные данные измерений объема клеток каждого вида (Sun and Liu, 2003; Olenina et al., 2006; Брянцева и др., 2005). Доминирующими считали виды, плотность которых составляла не менее 20% от общей плотности фитопланктона (Коновалова, 1984). «Цветение» динофитовых водорослей рассматривали как их массовое развитие, при котором плотность клеток превышала  $10^5$  кл./л. Для остальных отделов «цветение» характеризовалось плотностью, превышающей  $10^6$  кл./л (Colijn, 1992).

При проведении экологического анализа использовали классификацию фитопланктона по горизонтальному распределению (Киселев, 1969) с выделением групп.

Для проведения фитогеографического анализа использовали типы ареалов, предложенные Г.И. Семиной (1967, 1974) на основе различий в широто-зональном распространении видов микроводорослей.

#### **3.3.1 Электронная микроскопия**

Для уточнения видового состава материал исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Leo-430 Carl Zeiss, и трансмиссионного электронного микроскопа (ТЭМ) JEM 100 JEOL. При подготовке образцов были использованы стандартные методики (Truby, 1997; Hasle, Fryxell, 1970).

#### **3.3.2 Лабораторное культивирование**

Для идентификации редких и малоизученных видов микроводорослей применяли метод лабораторного культивирования. Полученные культуры микроводорослей в дальнейшем исследовали с использованием электронных микроскопов для уточнения

видовой принадлежности. Для длительного хранения лабораторные клоны помещены в криобанк.

### 3.4 Методы статистического анализа

Использовали стандартные математические методы, применяемые для биологических объектов.

## Глава 4. Результаты исследования и их обсуждение

### 4.1 Качественный состав микроводорослей прибрежных вод острова Русский

Представлены сведения о 272 видах и внутривидовых таксонах микроводорослей, относящихся к 8 отделам: диатомовые (Bacillariophyta), динофлагелляты (Dinoflagellata), эвгленовые (Euglenophyta), сине-зеленые (Cyanobacteria), охрофитовые (Ochrophyta), зеленые (Chlorophyta), криптофитовые (Cryptophyta) и гаптофитовые (Haptophyta) (Приложение Б). Отмечено значительное видовое разнообразие диатомовых водорослей рода *Skeletonema* – *S. costatum*, *S. dohrnii*, *S. grethae*, *S. japonicum*, *S. marinoi*. Среди них *S. dohrnii* и *S. marinoi* впервые зарегистрированы в морских водах России. Идентифицированы редкие виды *Pseudohaptolina sorokinii* и *Prorocentrum foraminosum*.

Сравнение полученных результатов со списком видов, представленным в литературе (Орлова и др., 2009) показало, что 75% видов являются общими для Амурского залива и прибрежных вод восточной части о-ва Русский; в целом характерны для фитопланктона прибрежных вод зал. Петра Великого.

#### 4.1.1 Таксономический состав фитопланктона на мониторинговых станциях

В результате изучения батометрических проб, собранных на мониторинговых станциях в б. Парис и прилегающей акватории с декабря 2012 г. по ноябрь 2015 г., обнаружено 178 видов и внутривидовых таксонов микроводорослей, относящихся к 6 отделам: Bacillariophyta (97 видов и внутривидовых таксонов), Dinoflagellata (70), Ochrophyta (6), Euglenophyta (3), Cryptophyta (1) и Haptophyta (1).

На протяжении всего периода исследования наибольшее число видов микроводорослей отмечали на станции, расположенной в непосредственной близости к садкам с морскими млекопитающими (станция в районе садков). Было идентифицировано 162 таксона, относящихся к 6 отделам.

Анализ видового состава фитопланктона на разных станциях показал, что в период наблюдений на станции в районе садков разнообразие микроводорослей было выше, чем

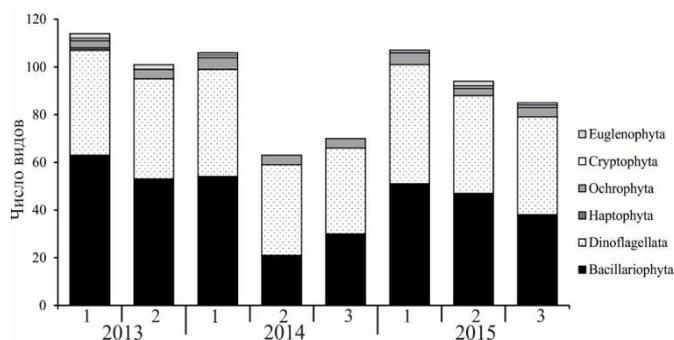


Рисунок 2 – Структура сообщества микроводорослей на станции в районе садков (1), контрольной станции (2) и станции водозабора (3) за весь период наблюдений

на остальных станциях (рис. 2). Вероятнее всего, это было обусловлено большим числом проб и круглогодичностью их сборов. Сравнение видового богатства по годам показало, что в 2013 г. наблюдали наибольшее число видов за весь период наблюдений. Наименьшее видовое богатство микроводорослей зарегистрировали в 2014

г. Одним из факторов, влияющих на сведения о видовом составе фитопланктона акватории, является число сборов и длительность наблюдений. В 2014 г. на контрольной станции и в районе водозабора период сбора проб был значительно короче по сравнению с 2013 и 2015 гг.

В целом, наши данные сопоставимы с результатами, известными для сопредельных вод: 119 видов и внутривидовых таксонов отмечено для Уссурийского залива (Бегун, 2004) и 375 для Амурского залива, где изучение микроводорослей проводили более 15 лет (Орлова и др., 2009). Также, сравнение оригинальных данных с представленными в литературе сведениями показало сопоставимый результат с видовым составом фитопланктона других акваторий зал. Петра Великого.

#### 4.1.2 Эколого-географическая характеристика планктонных микроводорослей в бухте Парис

Экологическая принадлежность была установлена для 120 видов микроводорослей (67% от общего числа видов). Основу флоры формировали пелагические виды. Бентические виды были представлены только диатомеями и составляли 6%. В фитоценозе преобладали неритические виды (66% от числа видов с известной экологической характеристикой), что характерно для прибрежных акваторий. Высокая доля океанических форм в составе фитопланктона (12%) свидетельствовала о влиянии на исследуемую акваторию водных масс открытой части зал. Петра Великого. Панталассные виды составляли 13%. На долю пресноводных видов приходилось 3%, что свидетельствовало о незначительном распреснении вод акватории.

#### 4.2 Динамика гидрохимических показателей среды в районе исследования

Значения гидрохимических показателей на станции в районе садков и на контрольной станции в б. Парис были схожи. Различия показателей солености, содержания растворенного кремния, органического фосфора и химического потребления кислорода между станциями были незначительными во все сезоны согласно U–критерию теста Манна-Уитни (рис. 3).

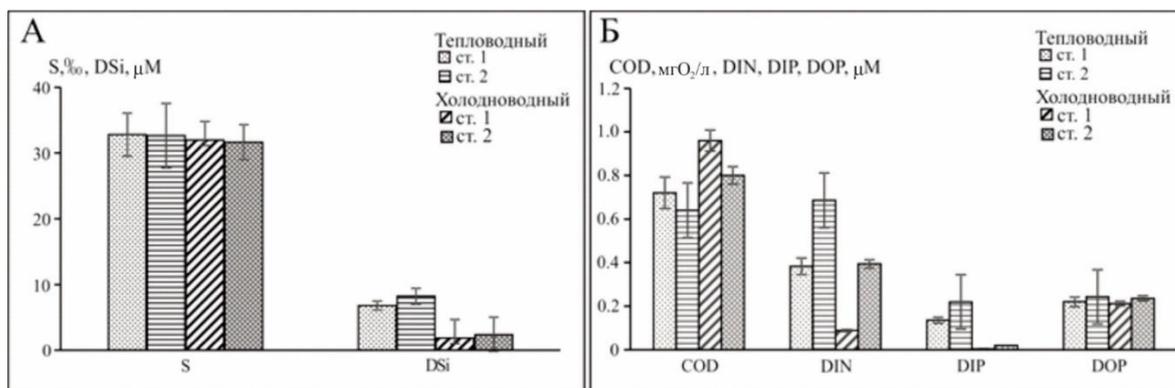


Рисунок 3 – Медианные значения: А – солености (S, ‰), растворенного кремния (DSi, µM); Б – химического потребления кислорода (COD, мгO<sub>2</sub>/л), растворенного неорганического азота (DIN, µM), растворенного неорганического (DIP, µM) и органического фосфора (DOP, µM) (Б), на станции в районе садков (ст. 1) и контрольной станции (ст. 2) в б. Парис в холодноводный и тепловодный сезоны 2013 г.

Концентрации растворенного неорганического азота (DIN) и фосфора (DOP) в тепловодный сезон также были схожи, но в холодноводный период их значения в районе садков были ниже, чем на контрольной станции, расположенной ближе к выходу из б. Парис (рис. 3). Это указывает на поступление морских вод из открытой части зал. Петра Великого, которые могут служить основным источником растворенного азота и фосфора в б. Парис. Проведенные исследования показали, что адвекция прилегающих вод и сезонные «цветения» фитопланктона оказывают определяющее влияние на гидрохимический режим б. Парис. Сходство количественных показателей отдельных гидрохимических параметров на станции в районе садков и на контрольной станции, расположенных в разных частях б. Парис, дают основание полагать, что содержание морских млекопитающих на акватории бухты не повлияло на уровень эвтрофности в период исследования.

### 4.3 Динамика количественных показателей фитопланктона в бухте Парис и прилегающих водах

#### 4.3.1 Сезонная и межгодовая динамика плотности микроводорослей

Анализ полученных данных показал, что с декабря 2012 по ноябрь 2015 гг. на всех станциях плотность фитопланктона изменялась от 1,3 тыс. кл./л до 13,7 млн кл./л. Максимальная плотность микроводорослей была отмечена в марте 2013 г. на станции в районе садков (рис. 4)

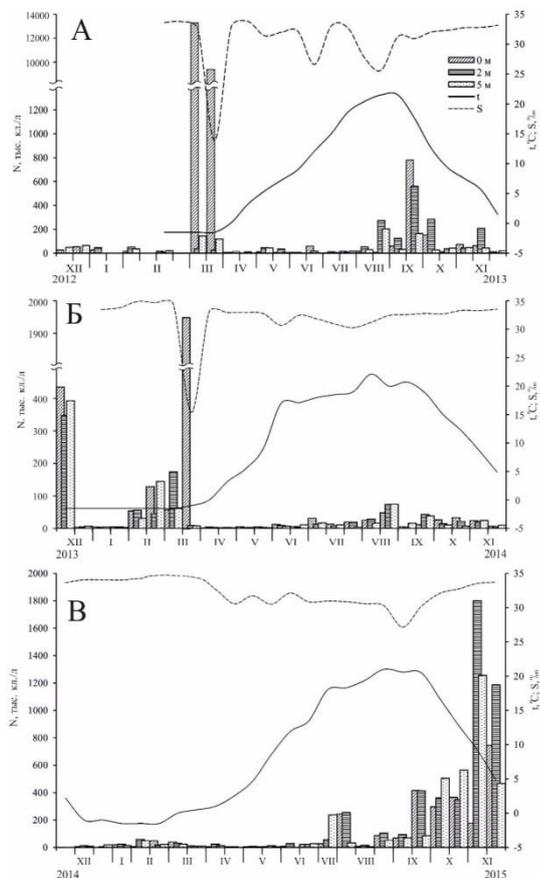


Рисунок 4 – Динамика плотности микроводорослей (N), температуры (t) и солёности (S) на трех горизонтах на станции в районе садков в первый (А), второй (Б) и третий (В) года исследования

Во второй год наблюдений (декабрь 2013–ноябрь 2014 гг.) плотность микроводорослей изменялась в пределах 1,5 тыс. кл./л–1,9 млн кл./л (рис. 4 Б). «Цветение» диатомеи *Thalassiosira nordenskiöldii* обусловило весеннюю, наиболее значительную за второй год исследования, вспышку фитопланктона. Максимум плотности микроводорослей (1,9 млн кл./л) зафиксировали в марте у поверхности воды, при температуре  $-1,3^{\circ}\text{C}$  и минимальной за год солёности –  $15,4\text{‰}$  (рис. 4 Б). В третий год исследования (декабрь 2014–ноябрь 2015 гг.) максимальную плотность отмечали осенью; «цветение» микроводорослей достигало 1,8 млн кл./л на горизонте 2 м и превосходило вспышку плотности фитопланктона в первый год исследования (рис. 4 А, В).

На контрольной станции с декабря 2012 по ноябрь 2015 гг. плотность микроводорослей варьировала в пределах от 1,6 тыс. кл./л до 1,3 млн кл./л. Сезонная

В первый год исследования (декабрь 2012–ноябрь 2013 гг.) плотность микроводорослей на станции вблизи садков с морскими млекопитающими изменялась в пределах 1,9 тыс. кл./л – 13,7 млн кл./л. В этот период отмечали три пика плотности фитопланктона: весенний, летний и осенний.

Весной, отмечали наиболее значительный за весь период наблюдений пик плотности микроводорослей, обусловленный массовым развитием гаптофитовой водоросли *P. sorokinii*. «Цветение» вида на исследуемой акватории отмечали 12 марта 2013 г., его плотность достигала 13,7 млн кл./л в поверхностном горизонте при температуре воды  $-1,2^{\circ}\text{C}$  и солёности  $32,5\text{‰}$ .

Во второй год наблюдений (декабрь 2013–ноябрь 2014 гг.) плотность микроводорослей изменялась в пределах 1,5 тыс. кл./л–1,9 млн кл./л (рис. 4 Б). «Цветение» диатомеи *Thalassiosira nordenskiöldii* обусловило весеннюю, наиболее

динамика ежегодно характеризовалась 2 пиками плотности: летним и осенним, обусловленными массовым развитием видов рода *Skeletonema*. Летние пики в первый и третий года исследования фиксировали на горизонте 2 м, во второй – на горизонте 5 м.

Большую плотность отмечали в последний год наблюдений – 874,4 тыс. кл./л; в первый год этот показатель был почти в два раза ниже (475,6 тыс. кл./л), а во второй – наименьший, достигающий 112 тыс. кл./л.

Осенние вспышки фитопланктона, за исключением второго года исследования, были также обусловлены массовым развитием представителей рода *Skeletonema*, как и на станции в районе садков. Плотность видов рода в первый и третий года наблюдений на контрольной станции несколько уступала значениям плотности *Skeletonema* spp. на станции в районе садков и составляла 1,1–1,2 млн кл./л.

На станции водозабор плотность микроводорослей изменялась от 1,6 тыс. кл./л до 1,2 млн кл./л; отмечали летний и осенний пики плотности микроводорослей, как и на других станциях в схожий период. Во второй год наблюдений фиксировали только летнюю вспышку (466,1 тыс. кл./л), как и на других станциях в это время, вспышка была сформирована массовым развитием представителей рода *Skeletonema*. В третий год отмечали летний и осенний пики плотности микроводорослей. Наибольший пик, осенний (1,2 млн кл./л), как и на остальных мониторинговых станциях, пик был обусловлен вегетацией *Skeletonema* spp. Летняя вспышка была значительно ниже (350,8 тыс. кл./л), основу сообщества микроводорослей формировали *Thalassionema frauenfeldii*, *Scrippsiella trochoidea*, *Prorocentrum. triestinum*.

В летне-осенний период сборы фитопланктона были проведены на трех станциях. Анализ сезонной динамики плотности фитопланктона показал, что отмечали либо один – летний пик плотности микроводорослей (такая картина была характерна для второго года исследования), или два – летний и осенний пики, как в первый и третий года наблюдений. Сравнение плотности фитопланктона между станциям в летне-осенний период показало, что максимум был отмечен осенью третьего года наблюдений в районе садков на глубине 2 м (1,8 млн кл./л), в тот же период на других станциях плотность микроводорослей была незначительно ниже: 1,2 млн кл./л – контрольная станция, 1,3 млн кл./л – станция в районе водозабора. На всех станциях развивались в массе виды рода *Skeletonema*. Летние пики плотности фитопланктона, также обусловленные массовым развитием *Skeletonema* spp., по интенсивности уступали осенним. Наибольшее

значение отмечали на контрольной станции в третий год исследований (884,2 тыс. кл./л). На других станциях плотность микроводорослей была ниже – 275,1 тыс. кл./л в первый год на станции в районе садков, 466,1 тыс. кл./л во второй год наблюдений на станции водозабор.

Согласно данным литературы, в районах, не подверженных антропогенному загрязнению, наблюдают преобладание осенних пиков количественных показателей развития фитопланктона над летними (Davis, 1964; Виноградова и др., 1986; Стоник, Орлова, 1998б). Два и три пика в годовой динамике плотности микроводорослей характерны для акваторий эвтрофного типа, что также может косвенно указывать на отсутствие влияния содержания морских млекопитающих на акваторию б. Парис в период исследования.

#### 4.3.2 Сезонная и межгодовая динамика биомассы фитопланктона

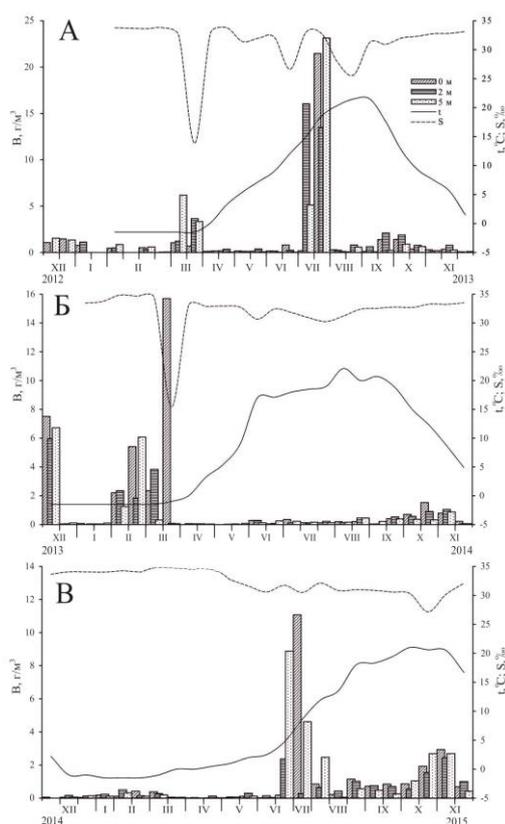


Рисунок 5 – Динамика биомассы микроводорослей (B), температуры (t) и солености (S) на трех горизонтах на станции в районе садков в первый (А), второй (Б) и третий (В) года исследования

Сезонная динамика биомассы фитопланктона в период наблюдений была схожей с динамикой плотности микроводорослей и характеризовалась 2–3 пиками. С декабря 2012 по ноябрь 2015 гг. биомасса фитопланктона варьировала от 5 мг/м<sup>3</sup> до 23,1 г/м<sup>3</sup>.

В первый год исследования в районе садков с морскими млекопитающими отмечали три вспышки увеличения биомассы фитопланктона – весной, летом и осенью (рис. 5 А). В летний период, в июле, зафиксировано максимальное значение биомассы за весь период исследования (23,1 г/м<sup>3</sup>). Пик был обусловлен развитием крупноклеточной динофлагелляты *Noctiluca scintillans* (22,9 г/м<sup>3</sup>) при температуре приповерхностного слоя воды 15–18°C и солености 32,7–33,0‰.

Во второй год наблюдений отмечали также три пика биомассы: весенний и осенний, как и в первый год исследования, а также зимний (рис. 5 Б).

В третий год исследования значения биомассы

фитопланктона изменялись от 27,7 мг/м<sup>3</sup> до 13,3 г/м<sup>3</sup>. За период наблюдений было отмечено две вспышки биомассы микроводорослей – летняя и осенняя (рис. 5 В); были сформированы вегетацией динофлагелляты *N. scintillans*.

На контрольной станции биомасса микроводорослей за все время исследования изменялась от 10 мг/м<sup>3</sup> до 10,2 г/м<sup>3</sup>. В целом, сезонная и межгодовая динамика биомассы фитопланктона на этой станции характеризовалась летним и осенним пиками, а в 2013 еще и весенней вспышкой биомассы.

В первый год исследования динамика биомассы фитопланктона описывалась тремя пиками. Первый пик, весенний (3,4 г/м<sup>3</sup>), был обусловлен массовым развитием холодноводной диатомовой водоросли *T. nordenskioeldii* на всех горизонтах при температуре воды 0,5°C. Летом на контрольной станции отмечали максимальный пик биомассы в первый год исследования – 10,2 г/м<sup>3</sup>, наблюдали развитие динофлагелляты *N. scintillans* (9,9 г/м<sup>3</sup>). Третий пик, осенний, обусловлен вегетацией *Skeletonema* spp. и *Ditylum brightwellii*.

Второй год исследования на контрольной станции характеризовался одним пиком биомассы – осенним; был образован крупноклеточной диатомеей *Rhizosolenia setigera* и охрофитовой водорослью *Dictyocha fibula*.

В третий год наблюдений на контрольной станции зафиксировали два пика биомассы – летний и осенний. Летняя вспышка (17,7 г/м<sup>3</sup>), как и в предыдущие года исследования на станции в районе садков и контрольной станции, была обусловлена развитием *N. scintillans*. Осенний пик был ниже; основу биомассы фитопланктона составляла *R. setigera*.

На станции водозабор сезонная и межгодовая динамика биомассы фитопланктона были схожи с таковой на контрольной станции. Отмечали летний и осенний пики, сформированные развитием *N. scintillans*.

Количественные параметры микроводорослей в б. Парис в целом сопоставимы с таковыми на соседних акваториях (Коновалова, 1972; Стоник, Орлова, 1998б; Бегун, 2004; Шевченко и др., 2014) и одного порядка с высокопродуктивными акваториями умеренных широт (Škaloud et al., 2006, Degerlund, Eilertsen, 2010). В динамике количественных характеристик фитопланктона между станциями наблюдали различия. В первый год исследования летний пик биомассы микроводорослей на станции в районе садков был в несколько раз выше, чем на контрольной станции, а в последний год

наблюдений пик биомассы осенью был в два раза выше на контрольной станции, чем на станции в районе садков. Таким образом, отсутствие общего тренда увеличения количественных параметров фитопланктона на станции в районе садков указывает, что в период исследования содержание животных не оказывало влияния на трофность акватории бухты.

#### **4.3.3 Сезонные комплексы микроводорослей в бухте Парис в период исследования**

В результате анализа видовых списков микроводорослей за каждый месяц на протяжении всего периода исследования установлено, что на уровне 20% четко выделялись две группы видов микроводорослей, характеризующихся специфическим набором видов: тепловодный и холодноводный комплексы. Анализ коэффициента сходства Брея-Кертиса показал, что станции группируются в комплексы с выраженной сезонностью – холодноводный комплекс четко отделен от тепловодного. Для каждого комплекса были выделены характерные группы видов микроводорослей.

В годовом цикле фитопланктона четко выделялись четыре сезонных комплекса микроводорослей, в значительной степени соответствующие биологическим сезонам, установленным ранее для зал. Петра Великого (Гайл, 1936; Коновалова, Орлова, 1988; Селина, 1988; Бегун и др., 2003; Бегун, 2004 и др.). Несовпадение в некоторых случаях границ сезонных комплексов и биологических сезонов обусловлено межгодовыми различиями гидрометеорологических условий. Наиболее устойчивой структурой обладали летний и осенний комплексы. Они всегда характеризовались максимальным видовым богатством, значительным набором специфических и характерных видов микроводорослей. Существенное видовое разнообразие микроводорослей в теплый период является отличительной чертой фитоценоза прибрежных акваторий зал. Петра Великого (Коновалова, 1979, 1984а, б; Паутова, Коновалова, 1982; Селина, 1988; Бегун и др., 2003; Бегун, 2004; Орлова и др., 2009).

#### **4.4 Виды фитопланктона, доминирующие в районе исследования**

В декабре 2012 г. – ноябре 2015 г. на мониторинговых станциях в б. Парис и Уссурийском заливе по плотности в планктоне доминировали 50 видов микроводорослей из 6 отделов: Bacillariophyta, Dinoflagellata, Euglenophyta, Naptophyta, Ochrophyta и Cryptophyta. Диатомовые преобладали по количеству видов (31); динофлагелляты были представлены меньшим числом видов (12); зеленые и охрофитовые водоросли насчитывали по 2 доминирующих вида. Остальные отделы

были представлены одним видом-доминантом. Анализ состава доминирующих видов показал, что две трети видов оказались общими для всех станций. Так, в зимний и ранне-весенний периоды на всех станциях на протяжении всего периода исследования отмечали преобладание диатомей родов *Thalassiosira* и *Navicula*. Весной при таянии льда и распреснении приповерхностного слоя воды в 2013 и 2015 гг. отмечали преобладание в фитоценозе представителей эвгленовых водорослей – *Eutreptia lanowii*, *Eutreptia* sp. Только в летний период в планктоне доминировали динофлагелляты. Так же, летом и осенью в планктоне на всех мониторинговых станциях в 2013–2015 гг. отмечали доминирование видов рода *Skeletonema*. Колонии *S. dohrnii* наблюдали в июне, при температуре приповерхностного слоя воды 11–17°C и солёности 26,2–32,1‰; вегетацию *S. marinoi* отмечали в сентябре, при прогревании приповерхностного слоя воды до 17,6–21,5°C и солёности 30,9–31,3‰; развитие *S. japonicum* отмечали в ноябре, при температуре 3–9°C и солёности 32,8–33,5‰. Выявленная приуроченность *S. dohrnii*, *S. marinoi* и *S. japonicum* к определенным экологическим условиям облегчит идентификацию видов при рутинных мониторинговых исследованиях фитопланктона (Шевченко, Пономарева, 2015).

Большинство отмеченных в нашем исследовании доминирующих видов (*T. nordenskioldii*, *T. frauenfeldii*, *P. triestinum*, *Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros didymus*, *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *Thalassionema nitzschioides*, *Navicula directa*, *Protoperidinium pellucidum*, *Protoperidinium pyriforme*) широко распространены и преобладают в планктоне умеренных широт Мирового океана (Trigueros and Orive, 2001; Škaloud et al., 2006; Hernández-Becerril et al., 2007). Для фитопланктона северо-западной части Японского моря в целом характерно доминирование диатомовых водорослей в зимне-весенний и осенний периоды, и динофлагеллят в летний сезон (Паутова, Силкин, 2000; Алексанин и др., 2012).

#### 4.4.1 Виды рода *Skeletonema*

Изучение сборов фитопланктона из б. Парис с применением сканирующей и трансмиссионной электронной микроскопии выявило присутствие 5 видов рода *Skeletonema* – *S. dohrnii*, *S. grethae*, *S. japonicum*, *S. marinoi* и *S. costatum*. Среди них *S. dohrnii* и *S. marinoi* впервые обнаружены в морских водах России.

С помощью методов лабораторного культивирования были получены альгологически чистые клоны *Skeletonema*. Идентификация клонов с помощью

электронной микроскопии подтвердила видовое разнообразие рода *Skeletonema* на акватории б. Парис. На основании полученных данных составлены расширенные морфологические описания, дополнены сведения по распределению видов в Мировом океане, составлены таблицы микрофотографий.

Известно, что для представителей рода характерны внутривидовая изменчивость и значительное перекрытие диагностических признаков (Ellegaard et al., 2008; Bergesch et al., 2009). Опубликован ряд работ, в которых видовая идентификация *Skeletonema* основывается на данных молекулярно-биологических методов исследования (Jung et al., 2009; Yamada et al., 2010). Полученные нами сведения подтверждают чрезвычайную вариабельность, в том числе и основных диагностических признаков.

#### **4.4.2 Зависимость между видами-доминантами фитопланктона и гидрохимическими параметрами среды**

Для иллюстрации взаимосвязи между доминирующими видами микроводорослей и гидрохимическими параметрами среды был применен канонический анализ соответствий (ССА).

Анализ корреляции между составом доминирующих видов и параметрами биогенных элементов на протяжении всего периода исследования показал, что существовали отличия между годами. Например, корреляцию между видами тепловодного комплекса и высокой концентрацией DIP наблюдали в 2013 г.; летне-осенние виды коррелировали с высокими концентрациями DIN, COD и DSi в 2014 г. и с высокими концентрациями DIN, DIP, DOP, COD и DSi в 2015 г. Для видов холодноводного комплекса корреляция с высокими значениями DIP и DOP была зафиксирована только в 2014 г.

Известно, что степень влияния биопродукционных процессов на химический состав прибрежных вод зависит от сезона. Для сопредельных эвтрофных вод указано, что избыточное поступление биогенных веществ стимулирует возникновение и продлевает время «цветения» фитопланктона (Шулькин и др., 2013). В то же время, согласно полученным нами данным, высокий уровень биогенов в водной среде может наблюдаться в процессе деструкции микроводорослей после их массового развития.

#### **4.5 Потенциально токсичные виды: разнообразие и сезонная динамика количественных параметров**

Морские млекопитающие являются конечным звеном пищевой цепи. Употребляя в пищу зараженную фикотоксинами рыбу или двустворчатых моллюсков, животные могут получить отравление вплоть до летального исхода (Anderson et al., 2008; Bargu et al., 2010). За весь период исследования в фитопланктоне б. Парис и в Уссурийском заливе обнаружено 16 видов потенциально токсичных микроводорослей. В б. Парис потенциально токсичные виды присутствовали на протяжении всего года. Самое низкое видовое богатство (5 видов) наблюдали в зимний период; наибольшее (15 видов) – летом.

Сравнение количественных параметров фитопланктона между станциями показало, что потенциально токсичные виды были обнаружены на всех мониторинговых станциях; пики их плотности не были приурочены к определенной станции. Плотность *Pseudo-nitzschia calliantha*, *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *Dinophysis acuta* и *Dinophysis rotundata* была выше на станции в районе садков, тогда как плотность *Pseudo-nitzschia multistriata*, *Dinophysis acuminata*, *Dinophysis infundibula*, *Prorocentrum minimum* была выше на контрольной станции.

Анализ полученных результатов показал, что плотность видов рода *Dinophysis* превышала ПДК, при которой рекомендован контроль за развитием токсинпроизводящего планктона на акваториях марикультурных хозяйств в странах Европы. Эти данные в сочетании со сведениями из литературы о высокой концентрации омега-3 кислоты в микроводорослях и моллюсках из зал. Петра Великого (Kameneva et al., 2016), свидетельствует о необходимости продолжения мониторинга потенциально токсичных видов фитопланктона на акватории б. Парис, особенно в районе содержания морских млекопитающих в садках на открытой воде.

## ВЫВОДЫ

1. Исследование таксономического состава фитопланктона бухты Парис и прилегающей акватории выявило 178 видов и внутривидовых таксонов микроводорослей из 6 отделов.

2. Годовая динамика количественных показателей фитопланктона в районе исследования характеризовалась 2–3 пиками. Плотность микроводорослей изменялась от 1,3 тыс. кл./л до 13,7 млн. кл./л, биомасса от 0,05 г/м<sup>3</sup> до 23,1 г/м<sup>3</sup>. Наиболее высокие показатели отмечены на станции в районе садков с морскими млекопитающими в 2013 г.

3. На гидрохимические параметры вод бухты Парис оказывали влияние сток с суши, водообмен с прилегающими акваториями, таяние льда и жизнедеятельность фитопланктона. Аномально высокие концентрации биогенных элементов (DSi – 57,1 μМ, COD – 7,04 мгО<sub>2</sub>/л, DIN – 11,1 μМ, DOP – 1,95 μМ) отмечали весной после «цветения» микроводорослей, совпадающего по времени с таянием льда.

4. Обнаружено 2 новых для морских вод России вида рода *Skeletonema*: *S. dohrnii* и *S. marinoi*. Показано, что *S. dohrnii* преобладал в июне; *S. marinoi* – в сентябре, *S. japonicum* – в ноябре.

5. По плотности доминировали 50 видов микроводорослей из 6 отделов. Ежегодно преобладали в холодноводный период *Eutreptia lanowii* (90% от общей плотности микроводорослей), *Thalassiosira nordenskiöldii* (98%), *Chaetoceros decipiens* (77%), *Licmophora abbreviata* (38%); в тепловодный период – *Thalassionema frauenfeldii* (97%), *Thalassionema nitzschioides* (83%), *Skeletonema* spp. (96%).

6. Круглогодично присутствовали в планктоне исследованной акватории потенциально токсичные микроводоросли; идентифицировано 16 видов. Наибольшие количественные параметры отмечали в тепловодный период на обеих станциях в бухте Парис.

7. Содержание морских млекопитающих в бухте Парис в декабре 2012–ноябре 2015 гг. не оказывало явного влияния на видовой состав и количественные характеристики фитопланктона, а также гидрохимические параметры воды исследованной акватории.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в журналах из списка, рекомендованных ВАК:*

1. Шевченко О.Г., Пономарева А.А. Морфология и экология морской диатомовой водоросли *Skeletonema marinoi* Sarno et Zingone, 2005 из Японского моря // Биология моря. 2015. Т. 41, № 6. С. 453–456.
2. Шевченко О.Г., Пономарева А.А. Новые для российских морей виды *Skeletonema* (Bacillariophyceae) в северо-западной части Японского моря // Ботанический журнал. 2016. Т. 101, № 9. С. 90–96.
3. Пономарева А.А., Шевченко О.Г. Цветение гаптофитовой водоросли в районе содержания морских млекопитающих на открытой воде // Вода: химия и экология. 2016. № 12. С. 54–58.

### *Работы, опубликованные в материалах конференций:*

1. Шевченко О.Г., Пономарева А.А. Фитопланктон б. Парис в районе открытых вольеров с морскими млекопитающими (о. Русский, Японское море) в 2013–2014 гг. // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана. Материалы III Международной научно-технической конференции. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2014. С. 279–283.
2. Shevchenko O.G., Ponomareva A.A. The morphology of the Diatoms genus *Skeletonema* from the Peter the Great Bay, the Sea of Japan // Abstracts of the 23th International Diatom Symposium. China, Nanjing, 7–12 September, 2014. P. 116.
3. Пономарева А.А., Шевченко О.Г., Емельянов А.А. Мониторинг фитопланктона в бухте Парис (остров Русский, залив Петра Великого, Японское море) в 2013–2014 гг. // Тезисы докладов XI съезда Гидробиологического общества при Российской академии наук. Красноярск, 22–26 сентября, 2014. С. 133–134.
4. Ponomareva A.A., Shevchenko O.G. HAB monitoring in Paris Bay (the northwestern of the East/Japan Sea) where marine mammals are kept in captivity // PICES–2015 «Change and sustainability of the North Pacific», October 14–25, 2015, Quindao, China. Programm and Abstracts. 2015. P. 154.
5. Шевченко О.Г., Пономарева А.А. Новые для морских вод России диатомовые водоросли рода *Skeletonema* // Материалы международной конференции «Проблемы систематики и географии водных растений», 21–24 октября, 2015, Борок. 2015а. С. 84–85.