

УДК 582.263(571.66)

С.О. Очеретяна<sup>1</sup>, Н.Г. Клочкова<sup>1</sup>, Т.А. Клочкова<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003;<sup>2</sup>Национальный университет Конджу, Конджу, 314-701, Корея  
e-mail: ninakl@mail.ru

## СЕЗОННЫЙ СОСТАВ «ЗЕЛЕННЫХ ПРИЛИВОВ» В АВАЧИНСКОЙ ГУБЕ И ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ФИЗИОЛОГИЮ И РОСТ НЕКОТОРЫХ ЗЕЛЕННЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ

За последние десятилетия видовой состав морских водорослей-макрофитов в Авачинской губе значительно сократился, и в настоящее время здесь наблюдается массовое развитие зеленых водорослей, называемое «зеленый прилив». В данной статье приводятся особенности сезонного развития видов, принимающих основное участие в формировании литорального макрофитобентоса. Показано, что ухудшение среды произрастания приводит к сокращению периода вегетации этих короткоживущих видов или к их неотеническому развитию. У ряда массовых видов из загрязненных местообитаний были обнаружены клеточные аномалии, появление внутриклеточных темно-коричневых включений. Подобные образования у тех же видов в чистых морских акваториях отсутствуют. В ходе лабораторного содержания водорослей после первых суток количество внутриклеточных включений заметно уменьшалось, а через 2-3 дня они полностью исчезали. Это свидетельствует об их трансформации в ходе внутриклеточных метаболических процессов. Сделано предположение, что появляющиеся внутри клеток включения – результат нарушения клеточных процессов, связанных с трансформацией загрязнителей и выведением продуктов метаболизма.

**Ключевые слова:** антропогенное загрязнение, «зеленые приливы», Камчатка, клеточные аномалии, неотеническое развитие.

S.O. Ocheretyana<sup>1</sup>, N.G. Klochkova<sup>1</sup>, T.A. Klochkova<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003; <sup>2</sup>Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea) **Seasonal species composition of “green tide”-forming algae from Avacha Bay and effect of anthropogenic pollution on physiology and growth of some green algae**

For last several decades, seaweed composition in the Avacha Bay has reduced dramatically and “green tides” became a common event. In this paper, we discuss peculiarities of seasonal development of species that compose major part of tidal seaweed communities. In ephemeral species, worsening of environmental conditions leads to reduction of their vegetation period or to neotenic development / juvenilization. In some common species from the contaminated habitats, cellular abnormalities were found, such as intracellular dark-brown inclusions. These inclusions were absent in the same algal species from the clean habitats. When algae were kept in the laboratory culture after being collected from the field, the number of intracellular inclusions decreased significantly after 1 day, and they disappeared completely after 2-3 days. This may indicate their transformation during intracellular metabolic processes. It is our understanding that these inclusions might be metabolites, which could not be excluded from the cells due to defaults of functioning in heavily polluted environment.

**Key words:** anthropogenic pollution, «green tides», Kamchatka, cell abnormality, neotenic development.

DOI: 10.17217/2079-0333-2015-33-30-36

О проблеме «зеленых приливов», вызываемых массовым развитием зеленых водорослей, в научной литературе сказано достаточно много, поскольку в последние десятилетия это негативное явление регистрировали по всему миру [1–7]. Массовое цветение зеленых водорослей чаще регистрировали в морских акваториях с теплым или умеренным климатом, например на побережьях Черного моря [2], Филиппин [5], о. Мадагаскар [8], на Китайском побережье Желтого моря [6, 9], в Южной Корее [10]. Это явление было зарегистрировано и в районах с более умеренным климатом, например в лагунах южного Приморья [11], Балтийском море [3], на побережье Чили [7], в других местах. Во всех случаях наряду с такими факторами, способствующими

щими развитию зеленого цветения, как температурный режим, соленость воды, течения и скорость ветра, указывалась значительная эвтрофикация водоемов [2–4, 6, 10].

Условия комплексного антропогенного загрязнения, вызывая постепенные изменения состава и структуры макрофитобентоса, приводят к выпадению из него стено- и мезотрофных многолетних или ложно многолетних бурых и красных водорослей. Их место постепенно занимают зеленые эфемерные водоросли, более устойчивые к органическому и токсическому загрязнению. Короткие и чрезвычайно гибкие жизненные циклы, высокая скорость и эффективность воспроизводства обеспечивают им постоянное присутствие в сообществах бентоса и конкурентные преимущества в заселении субстрата. Усиление ценотической роли зеленых водорослей в итоге приводит к катастрофическому снижению биоразнообразия макробентоса и постепенному опустыниванию литорали.

К настоящему времени самая большая проблема, вызванная цветением зеленых водорослей, возникла в июле 2008 г. в г. Циндао (Китай), когда почти 30% морской акватории напротив города (13,000 км<sup>2</sup>) было охвачено «зеленым приливом» [12]. Более 10 тыс. человек были мобилизованы для очистки моря, и акватория была очищена от 1 млн тонн ульвовых водорослей [6, 9], хотя предположительно их биомасса вдоль побережья Циндао достигала в тот период 20 млн тонн [12]. Примечательно, что от массового цветения водорослей в Китае пострадало и западное побережье Южной Кореи, где находится большинство открытых морских плантаций для выращивания красных водорослей. В результате сети на плантациях багрянок *Pyropia* [13] были загрязнены наплывом спор и слоевищ ульвовых водорослей. Это значительно снизило качество и стоимость выращиваемой водорослевой продукции. Таким образом, «зеленые приливы» являются не только неблагоприятным экологическим явлением, но также наносят существенный социально-экономический ущерб.

Среди бухт и заливов российского Дальнего Востока Авачинская губа в настоящее время является одной из самых загрязненных [1]. Ее интенсивное антропогенное загрязнение началось со второй половины прошлого века и отчетливо отразилось на состоянии макрофитобентоса с начала 1990-х гг. Наиболее загрязненным в губе является восточное побережье, вдоль которого расположен г. Петропавловск-Камчатский с его многочисленными промышленными предприятиями, местами базирования военно-морского, торгового, нефтеналивного и рыбного флотов и многочисленными канализационными коллекторами, несущими в акваторию хозяйственно-бытовые и производственные стоки.

Первое упоминание о «зеленых приливах» на Камчатке приводится в работе Н.Г. Клочковой и В.А. Березовской [1]. Позже массовое развитие зеленых водорослей в Авачинской губе обсуждали и другие авторы [14, 15]. Наряду с усилением их ценотической роли они отмечали, что в местах с высоким хроническим загрязнением, у представителей Chlorophyta обнаруживаются уродства и аномалии развития, видимые цитологические изменения, свидетельствующие об ухудшении физиологического состояния растений [14].

В ходе регулярных полевых наблюдений, проводимых в период 2009–2013 гг. в разных районах Авачинской губы, нами были определены виды, формирующие основу «зеленых приливов» в этой акватории в разные месяцы года. Изучение их анатомо-морфологического строения показало, что в загрязненных местах в холодное время года некоторым видам зеленых водорослей свойственно неотеническое развитие и появление внутриклеточных включений, имеющих вид многочисленных бурых капель округлой формы. Ниже описываются и обсуждаются обнаруженные нами явления.

### Материалы и методы

Для определения видового состава водорослей, формирующих «зеленые приливы», использовали данные обработки проб литорального макрофитобентоса, собранного с апреля 2009 г. по январь 2010 г. на разных участках восточного побережья Авачинской губы, расположенных от б. Сероглазка до м. Западный. Сбор проб водорослей производили 1–2 раза в месяц. В ходе таксономической обработки собранных проб входящие в них виды зеленых водорослей в зависимости от их количественного содержания делили на «редкие», «частые» и «массовые», если они составляли от общего объема пробы 10–20%, 30–50% и 60–100% соответственно. По результатам обработки полученных данных определяли помесечные и сезонные изменения ценотической роли этих видов и их участие в формировании «зеленых приливов» в Авачинской губе.

Сбор количественных и качественных (рамкой 10 × 10 см) проб макрофитобентоса осуществляли во время отливов в литоральной зоне и в сублиторальной кайме. Собранные растения помещали в светонепроницаемые пластиковые пакеты объемом 1 л и после возвращения в лабораторию помещали их в инкубатор при температуре 4°C и полном отсутствии света. Морскую воду, в которой находились собранные растения, периодически 1 раз в сутки заменяли свежей. Это позволяло в течение нескольких дней сохранять водоросли в живом состоянии и проводить наблюдения за их физиологическим состоянием и эксперименты. Для изучения внутриклеточного строения растений использовали микроскоп Olympus BX50. Измерение внутренних структур выполняли с помощью окуляр-микрометра, встроенного в объектив микроскопа.

В октябре-ноябре в 2010 г. зеленые водоросли были собраны также у м. Западный [14], когда температура поверхностного слоя воды в прибрежье составляла ниже 3°C, а температура воздуха в ночное время опускалась ниже 0°C. В ходе микроскопического изучения собранных образцов были зафиксированы множественные случаи присутствия в вегетативных клетках растений разных видов несвойственных им внутриклеточных включений. Для выяснения их природы растения с аномалиями клеточного строения помещали в отдельные чашки Петри и ежедневно просматривали под микроскопом для определения направлений трансформации этих включений. Результаты приведенных нами исследований обсуждаются ниже.

### Результаты и обсуждение

Высокое хроническое загрязнение прибрежных вод Авачинской губы городскими бытовыми стоками, нефтью, нефтепродуктами и тяжелыми металлами крайне негативно сказалось на альгофлоре ее восточного побережья, где оно практически повсеместно привело к формированию зеленого цветения. Наши исследования показывают, что массовое развитие зеленых водорослей наблюдается почти круглый год, однако видовой состав и особенно структура альгоценозов имеют при этом заметные помесечные изменения. Данные изучения этих изменений приведены на рис. 1.

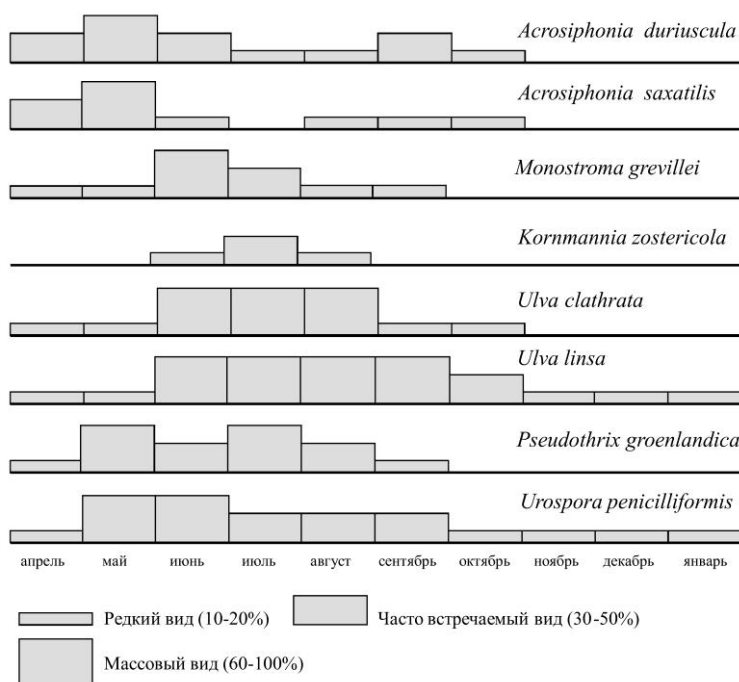


Рис. 1. Сезонная динамика видового состава в сообществах зеленых водорослей в Авачинской губе (апрель 2009 г. – январь 2010 г.)

Из приведенного выше рисунка видно, что в холодное время года доминантом растительных сообществ является зеленая водоросль *Urospora penicilliformis*. При этом в весенне-летнее время она была представлена в основном нитчатой стадией развития, в холодное осеннее – одноклеточной *Codiolum*-подобной стадией.

В самые теплые летние месяцы доминирование в альгоценозах перешло к трубчатым и пластинчатым видам (*Monostroma grevillei*, *Ulva* spp., *Kornmannia zostericola*, *Pseudothrix*

*groenlandica*). Среди данной морфологической группы видов, как это видно из рис. 1, только *Ulva linsa* встречается практически круглый год. Остальные ее представители в составе литоральной растительности присутствуют только в течение 3–7 месяцев, а в остальное время они сохраняются, судя по всему, в виде неподвижных покоящихся спор.

Пластинчатые и трубчатые водоросли, как показано на рис. 1, появляются ранней весной при достаточно низкой температуре воды и воздуха, но поздней осенью при таких же показателях температуры они уже не встречаются. Это свидетельствует о том, что значительное влияние на развитие пластинчатых и трубчатых видов оказывает световой режим, изменение которого весной направлено на постепенное увеличение длины дня, а осенью, напротив, на ее сокращение. На развитие видов, вероятно, влияет изменение высоты и ритмов приливно-отливных колебаний. Так, если весной наблюдается отчетливо выраженная разница высоты квадратурных и сизигийных приливов и отливов, и их весенняя и раннелетняя амплитуда в Авачинской губе достигает своего максимума, то осенью их амплитуда уменьшается, а высота практически выравнивается. Таким образом, условия обитания водорослей на литорали становятся иными, и это, видимо, препятствует развитию видов, нуждающихся в периодическом осушении.

Цветение зеленых водорослей на разных участках побережья имеет свои особенности, что объясняется их способностью использовать малейшие конкурентные преимущества заселения субстрата. В районах с самым сильным токсическим воздействием, например у городского канализационного коллектора, расположенного у сопки Никольская, *U. penicilliformis* доминирует практически во все месяцы года. Это, во-первых, свидетельствует об ее чрезвычайной устойчивости к техногенному и эвтрофному загрязнению.

Наши исследования показали, что в настоящее время хроническое антропогенное загрязнение распространилось и в район м. Западный, расположенного с мористой стороны п-ова Завойко, то есть на участок побережья, который еще относительно недавно считался благополучным из-за отсутствия береговых источников загрязнения. Этот район удален от береговых предприятий и канализационных выпусков и регулярно омывается приливыми водами из Авачинского залива. Однако многие водоросли из этого района уже имеют видимые аномалии развития, о чем ранее обсуждалось в работе С.О. Очеретяны и Н.Г. Ключковой [14]. В последние годы мы регулярно проводили сборы водорослей у м. Западный и почти всегда регистрировали те или иные аномалии развития у растений, такие как редукция их размеров, утолщение клеточных стенок, сокращение периода созревания спор. Все это является следствием физиологической адаптацией к неблагоприятным условиям произрастания.

Необычным и ранее не описанным явлением в строении клеток зеленых водорослей было присутствие у них многочисленных темно-коричневых включений округлой формы. Они занимали разное положение: центральное и пристеночное. Иногда их количество достигало 3–4, и они сливались в единый конгломерат. Ниже такие включения показаны для клеток *K. zostericola* (рис. 2), хотя они были найдены и у других видов водорослей этого района. Исключительное внимание к изучению данного вида объясняется тем, что он впервые был найден в холодное время года в неотенической форме развития. Собранные у м. Западный растения *K. zostericola* были многочисленными и формировали зеленый налет на скалистом грунте. Высота самых крупных из фертильных образцов у этого вида не превышала 5 мм, тогда как обычно длина зрелых пластинок у *K. zostericola* колеблется от 3 до 10 см.

Неотенически развитые растения, собранные у м. Западный, представляли собой обтрепанные пластинки, средняя длина которых едва достигала 2 мм, несущие в верхней части многочисленные фертильные клетки. Примечательно, что множество спор прорастало *in situ*, так как они не смогли отделиться от материнской пластины и использовали ее как субстрат. Прорастание спор *in situ* мы наблюдали и ранее у других видов зеленых водорослей тогда, когда их представители, постоянно находясь в воде, загрязненной различными поллютантами, были покрыты осевшей на их поверхность органической и минеральной взвесью, препятствующей отделению спор. Известно, что пластинчатые водоросли вырастают до 1–5 мм в длину за несколько дней. Неблагоприятные температурные и экологические условия в данном случае привели к сокращению периода вегетативного роста, и в ущерб формированию пластинок видоспецифических размеров и формы растения приступили к ускоренному размножению. Размерные характеристики клеток и их свойственное данному виду групповое расположение остались неизменными (рис. 3).

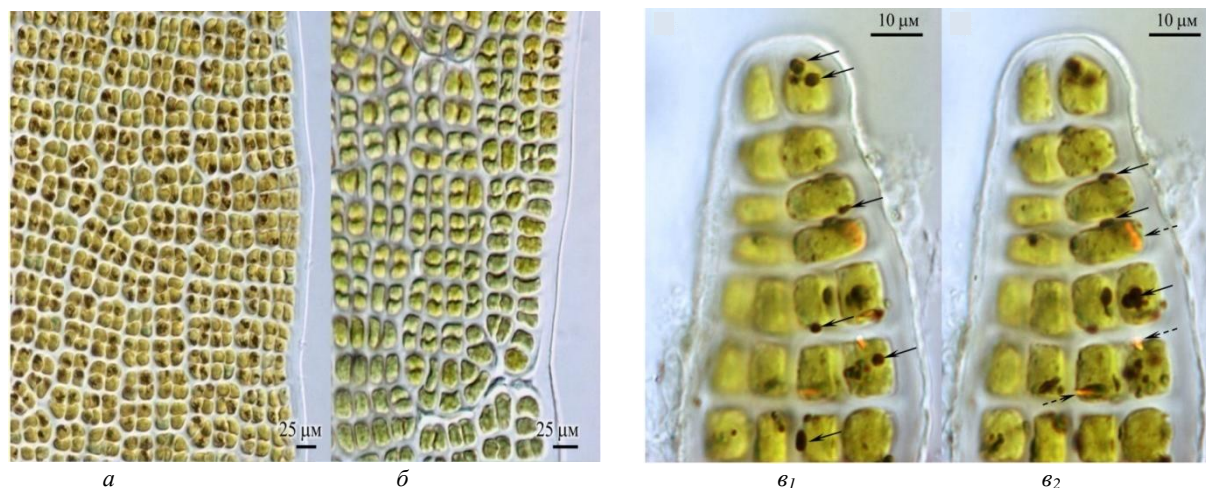


Рис. 2. *Kornmannia zostericola* с м. Западный (ноябрь 2009 г.): а – нижняя часть пластины с бурыми или ярко-оранжевыми каплями внутри клеток; б – верхняя часть этой же пластины, в которой клетки с бурыми каплями становятся более разреженными; в<sub>1</sub>-в<sub>2</sub> – верхушка молодой пластины (разная глубина резкости фокусирования) с пораженными клетками. Стрелками показаны бурые капли, покрывающие поверхность хлоропластов, и пунктирными стрелками показаны более светлые, ярко-оранжевые капли

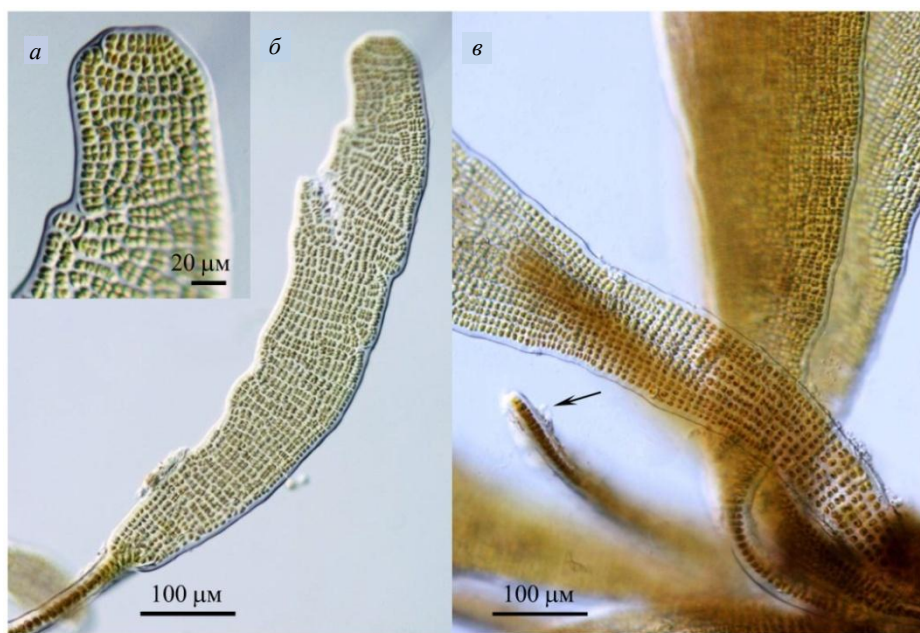


Рис. 3. Растения *Kornmannia zostericola* с м. Западный (ноябрь 2009 г.): а-б – взрослое растение перед началом спороношения. Отдельно показана верхушка пластины, с которой начинается выгонка спор (рис. а); в – несколько растений в разных стадиях развития пластины. Самое молодое растение показано стрелкой

Внутри почти всех клеток, как это показано на рис. 2, присутствовали темно-коричневые включения, похожие на капли какого-то густого вещества. В некоторых случаях капли были ярко-оранжевого цвета. Чаще всего бурые капли обильно покрывали поверхность хлоропластов, но иногда они просматривались в кутикулярном слое между клетками. Больше всего их было в нижней части растений и по мере удлинения пластины клетки, содержащие бурые включения, становились более разреженными. В настоящий момент мы не можем с достоверностью сказать, что приводит к их появлению в клетках зеленых водорослей. Однако вполне очевидно, что это какое-то вещество, а не какие-либо живые организмы, например грибки, бактерии или внутриклеточные паразиты водорослей. Во-первых, все темные капли оставались неподвижными, хотя в водорослевых клетках любого типа движение пузырьков в цитоплазме было бы заметно. Во-вторых, размеры даже самых крупных капель были меньше размеров основных клеточных оргanelл. Насколько нам известно, подобное явление ранее нигде не регистрировалось. Примечатель-

тельно, что все бурые включения исчезли из клеток после того как водоросли продержали в живом состоянии в холодильной камере (4°C) в течение несколько дней. При этом в окружающей их водной среде бурых капель тоже не было и цвет воды не изменился.

С начала 1990-х в акваторию Авачинской губы многократно поступали залповые выбросы токсических веществ и происходили катастрофические разливы нефтепродуктов [16]. Все это, безусловно, оказывало негативное воздействие на водоросли и вызывало аномалии их развития. Нефтяные углеводороды, как известно, являются одними из наиболее опасных и широко распространенных загрязнителей, а водорастворимые компоненты сырой нефти токсичны для морских растений и животных [17, 18]. Попавшая в море нефть может переноситься на сотни километров от места сброса, постепенно проникая в толщу морской воды и накапливаясь в донных осадках, а затем вновь всплывать на поверхность и создавать вторичное загрязнение из смеси соединений в основном неспецифического воздействия [19]. Токсичность нефтяного загрязнения обуславливают преимущественно полиароматические углеводороды.

Токсическое действие нефтепродуктов на водоросли относят к двум категориям: 1) общее покрытие таллома нефтяной пленкой, ингибирующее процессы фотосинтеза и дыхания, 2) поглощение гидрокарбонатов, приводящее к нарушению метаболических функций клетки [20]. Низкомолекулярные липофильные фракции нефти, включая ароматические соединения, являются наиболее токсичными, поскольку проникают в талломы растений наиболее легко. Проникая во внутренний липофильный слой клеточной мембраны, ароматические и другие токсичные гидрокарбонаты нарушают его целостность, в результате чего мембрана не может контролировать перенос ионов вовнутрь и за пределы клетки [20].

Выше уже обсуждалось, что воды Авачинской губы характеризуются крайне высоким содержанием различных загрязнителей, в том числе и нефтепродуктов. Мы полагаем, что бурые капли в клетках исследованных нами водорослей являются накопленными метаболитами, не выведенными в связи с нарушениями каких-либо клеточных функций. Многие отходы метаболизма токсичны для продуцирующего их организма до тех пор, пока они не выбрасываются в окружающую среду или не превращаются в безвредные вещества в самом организме. Примечательно, что мы никогда не находили подобные бурые и ярко-оранжевые включения внутри клеток водорослей, произрастающих в чистых местообитаниях, что явно указывает на то, что их появление напрямую связано с загрязнением прибрежных вод, в первую очередь нефтепродуктами.

Таким образом, наши исследования показывают, что, несмотря на высокий уровень полисапробности зеленых водорослей и их способность накапливать некоторые нефтепродукты [3, 14], даже в относительно незагрязненных районах Авачинской губы представители этой группы демонстрируют аномалии клеточного развития или адаптивные изменения морфогенетического развития, приводящие к появлению неотенических форм развития.

### Литература

1. Клочкова Н.Г., Березовская В.А. Макрофитобентос Авачинской губы и его антропогенная деструкция. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 208 с.
2. Теубова В.Ф., Ефимова О.В. Макрофитобентос урезовой зоны Новороссийской бухты (Черное море) в условиях антропогенного воздействия // Экология моря. – 2003. – Т. 64. – С. 67–71.
3. Novel morphology in *Enteromorpha* (Ulvophyceae) forming green tides / J. Blomster, S. Bäck, D.P. Fewer, M. Kiirikki, A. Lehvo, C.A. Maggs, M.J. Stanhope // American Journal of Botany. – 2002. – Vol. 89. – P. 1756–1763.
4. Fletcher R.L. The occurrence of «green tides»: a review // Marine benthic vegetation: recent changes and the effects of eutrophication / Schramm W., Nienhuis P.H. (Eds.). – Berlin: Springer, 1996. – P. 7–43.
5. Taxonomic and ecological profile of «green tide» species of *Ulva* (Ulvales, Chlorophyta) in central Philippines / D.B. Largo, J. Sembrano, M. Hiraoka, M. Ohno // Hydrobiologia. – 2004. – Vol. 512. – P. 247–253.
6. The identity of the Qingdao algal bloom / F. Leliaert, X. Zhang, N. Ye, E.J. Malta, A.E. Engelen, F. Mineur, H. Verbruggen, O. De Clerck // Phycological Research. – 2009. – Vol. 57. – P. 147–151.
7. A «green tide» problem caused by *Enteromorpha* sp. in Dichato, Chile / M. Ohno, C. Werlinger, S. Shimada, M. Hiraoka // Proceedings of 17th International Seaweed Symposium. Cape Town, South Africa. – 2001. – P. 243–248.

8. Мусатенко Л.И. Ботанические исследования в морских экспедициях на Мадагаскар [Электронный ресурс]. – URL: [http:// www.africana.ru/science/Russia\\_Madagascar/musatenko-rtf.rtf](http://www.africana.ru/science/Russia_Madagascar/musatenko-rtf.rtf).
9. Quindao algal bloom culprit identified / F. Leliaert, E.J. Malta, A.H. Engelen, F. Mineur, O. De Clerck // *Marine Pollution Bulletin*. – 2008. – Vol. 56. – P. 1516.
10. Effect of salinity on growth and nutrient uptake of *Ulva pertusa* (Chlorophyta) from an eelgrass bed / T.S. Choi, E.J. Kang, J.-H. Kim, K.Y. Kim // *Algae*. – 2010. – Vol. 25. – P. 17–26.
11. Набивайло Ю.В., Скрипцова А.В., Тутлянов Э.А. Взаимное влияние водорослей сообщества *Gracilaria gracilis* (Rhodophyta) // *Биология моря*. – 2005. – Т. 31. – С. 338–343.
12. A strategy for the proliferation of *Ulva prolifera*, main causative species of green tides, with formation of sporangia by fragmentation / S. Gao, X. Chen, Q. Yi, G. Wang, G. Pan, A. Lin, G. Peng // *PLoS ONE*. – 2010. – Vol. 5(1): e8571. – doi:10.1371/journal.pone.0008571.
13. Клочкова Т.А., Ким Г.Х. Заболевания красной водоросли *Pyropia* (= *Porphyra*) на открытых морских плантациях Южной Кореи // *Вестник КамчатГТУ*. – 2015 – № 32. – С. 48–52.
14. Очеретяна С.О., Клочкова Н.Г. Позднеосенний состав зеленых эфемерных водорослей в районах бункеровок флота в Авачинской губе (юго-восточная Камчатка) // *Вестник КамчатГТУ*. – 2010. – № 11. – С. 58–64.
15. Хайнасова Т.С. Зеленые водоросли (Chlorophyta) во флоре Авачинской губы // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: материалы VII междунар. науч. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2006. – С. 252–255.
16. Klochkova N.G., Klotchkova T.A. Long-term changes of vegetative communities and benthic algaeflora in the Avacha Bay // *Monographs on the ecology and environment of the Avacha Bay (Southeast Kamchatka)*. – Petropavlovsk-Kamchatsky – Tokyo. – 1998. – P. 137–149.
17. Oil pollution of marine algae / N. Binark, K.C. Güven, T. Gezgin, S. Ünlü // *The Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2000. – Vol. 64. – P. 866–872.
18. Zambrano J., Carballeira A. Effects of hydrocarbons on the physiology and growth of *Ulva* sp. (Chlorophyta) // *Boletín Instituto Español de Oceanografía*. – 1999. – Vol. 15. – P. 373–381.
19. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. – М.: ВНИРО, 2001. – 247 с.
20. Lobban C.S., Harrison P.J. Seaweed ecology and physiology // Cambridge University Press. – Cambridge, New York. – 1997. – 366 p.