

Экотоксикологический мониторинг арктических морей

С. А. Мошаров, доцент, канд. биол. наук¹

М. Н. Корсак, доцент, канд. биол. наук²

М. И. Кроленко, старший преподаватель³

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

²ФГУЗ «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора

³Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана

e-mail: mosharov@ocean.ru

Ключевые слова:

экотоксикология,
фитопланктон,
первичная продукция,
токсиканты,
критические концентрации,
арктические и субарктические моря.

Впервые представлены результаты широкомасштабных экотоксикологических исследований устойчивости фитопланктонных сообществ (эко-токсикологический мониторинг), выполненных в один сезон (летний период сукцессии) во всех морях российской Арктики и Субарктики. Эксперименты по влиянию на первичную продукцию разных концентраций меди (Cu) выполнялись в условиях, приближенных к природным, в ходе рейсов на научно-исследовательских судах «Николай Коломейцев» и «Профессор Штокман». В ходе 68 краткосрочных токсикологических экспериментов на борту судна изучалось влияние некоторых добавок меди на величину первичной продукции исследованных районов морей.

1. Введение

Экотоксикологический мониторинг морских экосистем является составной частью комплексного экологического мониторинга Мирового океана. В число его задач входят: индикация экологического состояния природных объектов на шкале «норма-патология»; оценка сравнительной уязвимости (устойчивости) природных экосистем, выявление и ранжирование причин нарушения экологического благополучия; нормирование воздействия на экосистемы и прогноз экологического состояния систем на основе предполагаемых значений потенциальных абиотических воздействий [1].

Опасность загрязнения водоемов токсическими веществами заключается в том, что нарушается сбалансированность процессов новообразования и разрушения органического вещества и возникает реальный риск снижения устойчивости экосистемы до критического уровня, при котором даже небольшое дополнительное негативное воздействие может привести к необратимой деградации рассматриваемых систем. Возрастание токсического воздействия на экосистему сначала приводит к резкому снижению численности нерезистентных видов гидробионтов и уменьшению суммарной продукции органического вещества, а при сохранении антропогенного давле-

ния — к элиминации некоторых видов и изменению структуры сообщества [1–3]. При снятии антропогенного воздействия возможны как восстановление структуры сообщества, так и критические (необратимые) изменения, выражающиеся, в частности в элиминации отдельных видов и деградации экосистемы. Под критической концентрацией загрязняющего вещества подразумевается такая его концентрация, при которой даже небольшое дополнительное негативное воздействие может привести к необратимому снижению уровня устойчивости биологического процесса или показателя, выбранного в качестве «мишени» [1, 4].

Воздействие различных внешних негативных факторов на морские экосистемы проявляется на различных уровнях организации (от клетки до экосистемы в целом), но ведущую роль для оценки и прогноза состояния экосистем играют реакции первичного звена биологической продукции — микроскопических водорослей, или фитопланктона, определяющих обеспеченность пищей всех последующих звеньев пищевой цепи в водной экосистеме. Среди важнейших параметров, характеризующих состояние фитопланктонного сообщества (скорость роста популяции водорослей, содержание хлорофилла, изменение видового состава сообщества), к негативному воздействию наиболее чувствительна интенсивность фотосинтеза

(первичное продуцирование). Поэтому изучение изменения продукционных процессов под воздействием негативных факторов (загрязняющих веществ) дает наиболее адекватное представление о реакции экосистемы на загрязнения [1, 5].

Для оценки устойчивости природных сообществ фитопланктона к негативным токсическим факторам в последние годы используют краткосрочный экотоксикологический эксперимент, основанный на количественной оценке реакции фитопланктонного сообщества на внесение различных концентраций токсиканта [6-8]. В качестве биологической мишени воздействия в таких экспериментах чаще всего выбирают функциональные показатели, определяющие устойчивость и сбалансированность экосистемы в целом, в частности величину первичной продукции органического вещества [9, 10]. В качестве стрессового фактора воздействия в экспериментах часто используют какой-либо токсичный металл, например медь [10].

Медь — важный микроэлемент, необходимый для многих метаболических и физиологических процессов у автотрофных организмов, в том числе и фитопланктона [11]. Однако при повышенной концентрации медь становится потенциальным токсикантом, неблагоприятно воздействующим на рост, развитие и размножение водорослей [12]. Медь при концентрации выше 1 мкМ¹ может стать ингибитором фотосинтетического электронного транспорта, приводить к деградации внутренней структуры хлоропласта и уменьшению содержания пигмента [13]. Хорошо известны негативные эффекты меди — ингибирование роста автотрофных организмов и нарушение проницаемости мембран клеток [14].

При практическом определении и последующем сравнении критических концентраций отдельных загрязняющих веществ в разных районах Мирового океана основная сложность связана с большой вариабельностью показателей токсичности в зависимости от изменения видового состава планктонных сообществ в разные периоды сезонной сукцессии [1, 3, 6]. Экотоксикологические эксперименты выполняются только в ходе специальных морских экологических экспедиций, когда маршрут и время стоянки судна на станциях строго регламентированы и их нельзя изменить. При этом чаще всего экотоксикологические эксперименты в различных районах океана выполняются в разные периоды биологического сезона, что затрудняет последующее сравнение полученных данных. Например, в ряде работ показано, что токсичность одних и тех же концентраций токсичных металлов в разные периоды сезонной сукцессии фитопланктона может значительно различаться [8, 10, 15].

2. Материалы и методы исследования

Целью выполненных в ходе рейсов научно-исследовательских судов (НИС) «Николай Коломейцев» и «Профессор Штокман» широкомасштабных экотоксикологических исследований устойчивости фитопланктонных сообществ (экотоксикологический мониторинг) в морях Российской Арктики и Субарктики (Балтийском, Белом, Баренцевом, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском и Беринговом) было получение новых данных о сравнительной устойчивости изученных экосистем к одному стрессовому химическому фактору — содержанию в воде меди (Cu) практически в один период сезонной сукцессии планктонного сообщества — конец лета. Схема районов исследований приведена на рис. 1.

Эксперименты по изучению влияния разных доз концентраций меди (Cu) на первичную продукцию выполняли по схеме «доза-эффект» в условиях, приближенных к природным *in situ* [4, 8, 10]. В качестве экологической «мишени» использовали первичную продукцию (скорость образования органического вещества фитопланктоном в ходе фотосинтеза), которую определяли радиоуглеродным методом [10]. Отобранные пробы исследуемой воды из поверхностного слоя (0,5 м) делили на несколько подпроб, в которые вносили растворы $CuSO_4 \cdot 6H_2O$ с таким расчетом, чтобы концентрация меди в экспериментальных склянках варьировала в диапазоне 5–100 мкг Cu/л. Эксперименты с каждой концентрацией выполнялись дважды. Три склянки экспонировались без добавки токсиканта — две на свету и одна в темноте.

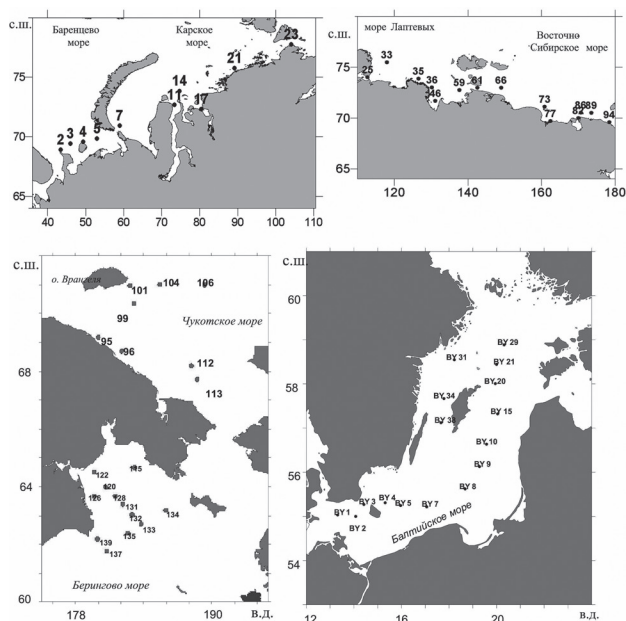


Рис. 1. Районы исследований.
Цифрами на рисунке обозначены точки исследования

¹ мкМ – микромоль

Склянки с пробами экспонировали в ванне с периодически сменяемой заборной водой при естественном освещении в течение 24 часов. Фильтрацию и обработку проб осуществляли в соответствии с общепринятой методикой. Просчет препаратов и определение исходной активности раствора $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ проводили на сцинтилляционном счетчике Mark II также по общепринятым методикам [10, 15]. Мерой устойчивости был выбран показатель LD_{50} (концентрация токсиканта, вызывающая снижение первичной продукции на 50%).

Полученные в ходе экспериментов значения первичной продукции при соответствующих концентрациях токсиканта изображались графически для каждого эксперимента. Графики, отражающие изменение активности фотосинтеза в зависимости от концентрации меди в воде, использовались для определения LD_{50} . Всего в разных районах изученных субарктических и арктических морей было выполнено 68 экотоксикологических экспериментов.

3. Результаты и обсуждение

Экотоксикологические эксперименты показали, что во всех арктических морях негативное воздействие меди на фотосинтетическую способность фитопланктона проявлялось в диапазоне концентрации 5-125 мкг/л. При этом характер реагирования фитопланктона на увеличение концентрации меди существенно варьировал в разных экспериментах, т.е. для проб, взятых на разных океанографических станциях в пределах одного моря. Полученные экспериментальные зависимости можно разделить на три типа реагирования [16], представленные на рис. 2.

- а) Остротоксическое действие меди на первичную продукцию, при котором происходит резкое снижение фотосинтетической активности уже при небольшой концентрации меди, и дальнейшее ингибирование при более высоких концентрациях.
- б) Более медленное уменьшение скорости фотосинтеза при увеличении концентрации меди.

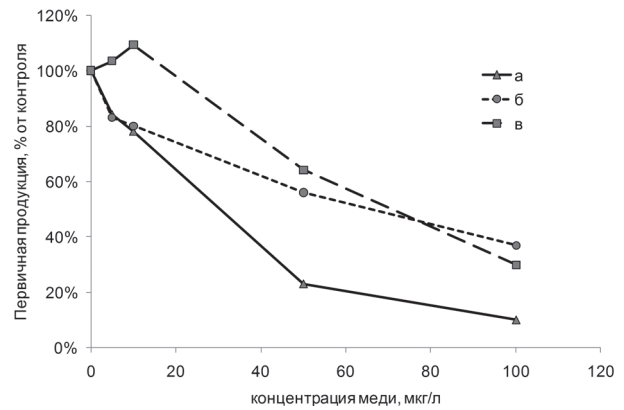


Рис. 2. Типы реагирования фитопланктона на токсическое воздействие меди в зависимости от концентрации токсиканта в воде: а – острый токсикоз, б – медленные изменения, в – стимулирование с последующим ингибированием фотосинтеза

В отдельных случаях при достижении некоторого предельного низкого уровня первичной продукции с дальнейшим повышением концентрации токсиканта этот уровень существенно не изменялся.

- в) Стимулирование фотосинтетической активности при небольшой концентрации меди (5-10 мкг/л) и последующее снижение (ингибирование) фотосинтеза при увеличении концентрации.

Эффект стимулирования с последующим ингибированием фотосинтеза при постепенном увеличении концентрации токсиканта (меди) в воде наблюдался в 50% экспериментов. Причем в Балтийском море этот эффект наблюдался особенно часто — в 80% выполненных экспериментов. Если учесть, что пробы для экотоксикологических исследований отбирались по всей акватории открытой Балтики (см. рис. 1), то можно говорить о характерной особенности балтийского фитопланктона в этом отношении — адаптации к присутствию меди в воде [17]. Это может быть связано с высоким уровнем загрязнения в Балтийском море и, в частности с природной концентрацией меди на уровне 5 мкг/л [16, 18].

Таблица 1

Средние значения и диапазон варьирования LD_{50} (мкг Cu/л) для первичного продуцирования фитопланктона в арктических морях

| Море | Количество экспериментов | Среднее LD_{50} (среднее ± станд. откл.) | Минимальное LD_{50} | Максимальное LD_{50} |
|--------------------|--------------------------|--|-----------------------|------------------------|
| Балтийское | 17 | 53±19 | 35 | 100 |
| Белое | 5 | 38±6 | 30 | 45 |
| Баренцево | 1 | 50 | 50 | 50 |
| Карское | 4 | 69±40 | 40 | 125 |
| Лаптевых | 4 | 60±12 | 50 | 70 |
| Восточно-Сибирское | 4 | 38±27 | 10 | 75 |
| Чукотское | 18 | 41±27 | 5 | 120 |
| Берингово | 15 | 42±19 | 5 | 80 |

В результате анализа и обобщения данных, полученных в экотоксикологических экспериментах с медью, установлено, что средний уровень LD_{50} для исследованных арктических морей составляет 49 ± 27 мкг Си/л (среднее \pm станд.откл.), пределы вариаций этого параметра — от 5 до 125 мкг Си/л (табл. 1).

Наибольшая устойчивость фитопланктона к токсическому фактору (меди) обнаружена в морях Балтийском, Карском, Лаптевых (средние LD_{50} от 53 до 69 мкг Си/л). Балтийское море окружено развитыми промышленными странами, что естественно сопровождается высоким уровнем загрязнения морских вод, в том числе и тяжелыми металлами. В этих условиях фитопланктон адаптируется к высоким концентрациям токсикантов в среде и становится более устойчивым к их воздействию, что было показано во многих исследованиях [8, 10, 15, 19, 20]. Аналогичные эффекты наблюдались в морях Карском и Лаптевых, где районы исследований находились в зоне влияния стока мощных сибирских рек — Енисея и Оби в первом случае и Лены во втором. В зонах смешения речных и морских вод в наибольшей степени проявляется варибельность природных гидрологических и гидрохимических экологических факторов, определяющих условия существования фитопланктона, и, кроме того, с речным стоком выносятся большое количество загрязняющих веществ, в том числе и тяжелых металлов. Очевидно, что в таких условиях фитопланктон адаптируется к негативным факторам и становится более устойчивым к их воздействию, сохраняя исходную способность к новообразованию органического вещества в ходе фотосинтеза. Показателем такой устойчивости могут служить результаты величин LD_{50} , которые в первом приближении можно принять за величины «критических концентраций» [1, 4].

Наименьшая устойчивость фитопланктона к меди была установлена в Белом и Восточно-Сибирском морях (средние $LD_{50} < 40$ мкг Си/л). Эти моря характеризуются невысоким уровнем загрязнения, в результате фитопланктон слабо адаптирован к не-

гативному воздействию гидрохимических факторов (в частности к высокой концентрации меди). В Чукотском море была обнаружена наиболее сильная варибельность токсического эффекта меди на фитопланктон в разных районах моря — от 5 до 125 мкг/л. Очевидно, что экологические условия в этих районах существенно различались.

Наиболее устойчивыми к воздействию изученных загрязняющих веществ в восточной Арктике оказались экосистемы прибрежных районов Чукотского моря и мелководной зоны в его северной части. Следует отметить высокую чувствительность к токсикантам фитопланктонных сообществ Анадырского залива Берингова моря. Более высокая устойчивость планктонных сообществ Чукотского моря по сравнению с организмами Берингова моря в ходе экотоксикологических экспериментов была установлена и ранее [6, 7].

4. Заключение

Проведенный экотоксикологический мониторинг российского сектора субарктических и арктических морей позволил собрать новую информацию о величине «критической концентрации» меди, необходимую для оценки относительной толерантности исследованных экосистем к антропогенному воздействию, провести районирование и выделить области наибольшей чувствительности фитопланктона к действию загрязняющих веществ. Результаты выполненных экотоксикологических экспериментов в высокопродуктивных морях российского сектора Арктики позволяют оценить пределы вариации «критических концентраций» загрязняющих веществ в водоемах разного типа, а также получить представление о возможной изменчивости функциональных характеристик фитопланктона в присутствии загрязняющих веществ при различной биологической структуре сообществ. Это особенно важно для оценки риска возможных негативных последствий для морских экосистем в ходе предполагаемой добычи полезных ископаемых на Арктическом шельфе.

Литература

1. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 528 с.
2. Даллакян Г.А., Корсак М.Н., Никифорова Е.П. Исследование воздействия цинка, хрома и кадмия на продукцию фитопланктона // Водные ресурсы. 1988. №1. С. 83–89.
3. Носов В.Н., Корсак М.Н., Сироткина Н.В. Влияние цинка и хрома на фитопланктон // Гидробиологический журнал. 1981. Т. XVII, вып. 4. С. 83–87.
4. Корсак М.Н. Эколого-токсикологические методы // Методические основы комплексного экологического мониторинга океана / Под ред. Ю.А. Израэля, А.В. Цыбань. М.: Гидрометеиздат, 1988. С. 261–268.
5. Gidding J.M., Stewart A.J., O'Neil R.V., Gardner R.H. An efficient algal bioassay based on short-term photosynthetic response // Aquatic Toxicology and Hazard Assessment: Sixth Symposium ASTM STP 802 / W.E. Bishop, R.D. Cardwell and B.B. Heidolph (eds.). 1983. P. 445–459.
6. Korsak M.N., Whitedge T.E., Kudryavtsev V.M., Mamaeva N.V. Investigation of negative effects and critical concentrations of some toxic substances on the plankton community // Results of the Third Joint US-USSR Bering and Chukchi Seas Expedi-

- tion (BERPAC) Summer 1988 / P.A. Nagel (ed.). Washington D.C., U.S. Fish and Wildlife Service, 1992. P. 357–363.
7. Belevich T.A., Korsak M.N. Response of phytoplankton communities of the Bering and Chukchi Seas to certain organic Pollutants and heavy metals // Proc. NIPR Symp. Polar Biol., 1996. N 9. P. 131–139.
 8. Мошаров С.А., Серова Е.М., Корсак М.Н., Даллакян Г.А. Экоотоксикологические исследования фитопланктонных сообществ в Балтийском море // Вестник Московского Университета. Сер. 16, Биология. 2005. № 2. С. 42–45.
 9. Домнин С.Г., Корсак М.Н., Мошаров С.А. К проблеме оценки устойчивости планктонного сообщества к негативным воздействиям // Экология. 2005. №4. С. 294–299.
 10. Даллакян Г.А., Корсак М.Н., Мошаров С.А. Влияние меди на продукционные процессы в Балтийском море // Вестник Московского Университета. Сер. 16, Биология. 2002. № 1. С. 42–45.
 11. Linder M.C. Biochemistry of Copper. Plenum Press, New York. 1991.
 12. Fernandes J.C., Henriques F.S. Biochemical, physiological and structural effects of excess copper in plants // Botanical Review. 1991. V. 57. P. 246–273.
 13. Ouzounidou G. Copper-induced changes on growth, metal content and photosynthetic function of *Alyssum montanum* L. plants // Environmental and Experimental Botany. 1994. N 34. P. 165–172.
 14. Ouzounidou G., Eleftheriou E.P., Karataglis S. Ecophysiological and ultrastructural effects of copper in *Thlaspi ochroleucum* (Cruciferae) // Canadian Journal of Botany. 1992. N 70. P. 947–957.
 15. Корсак М.Н., Тимошенкова Н.П. Эколого-токсикологические исследования в пелагиали Балтийского моря летом 1987 г. // Исследование экосистемы Балтийского моря. Вып. 3, 1990.
 16. Патин С.А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана. М.: Пищевая промышленность, 1979.
 17. Мошаров С.А., Корсак М.Н., Серова Е.М., Даллакян Г.А. Особенности токсического влияния меди на различные фитопланктонные сообщества Балтийского моря // Вестник Московского Университета. Сер. 16, Биология. 2009. № 3. С. 34–39.
 18. Third Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea, 1989–1993, Helsinki: HELCOM, 1996, issue 64A.
 19. Lombardi A.T., Vieira A.A.H. Copper and lead complexation by high molecular weight compounds produced by *Sinura* (Chrysophyceae) // Phycologia. 1998. N 37. P. 34–39.
 20. Fathi A.A., El-Shahed A.M. Response of tolerant and wild of *Scenedesmus biguja* to copper. 2000 // Biologia Plantarum. V. 43, N 1. P. 99–103.

Arctic Seas' Ecological and Toxicological Monitoring

S.A. Mosharov, Associate Professor, Ph.D. in Biology, P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science
M.N. Korsak, Associate Professor, Ph.D. in Biology, Rospotrebnadzor's Federal Center of Hygiene and Epidemiology
M.I. Krolenko, Senior Lecturer, Bauman Moscow State Technical University

For the first time the results of large-scale ecological and toxicological researches related to phytoplankton communities' stability (ecological and toxicological monitoring) executed in the same season (summer period of succession) in all seas of Russian Arctic and Subarctic region – Baltic, White, Barents, Kara, Laptev, East Siberian, Chukchi and Bering Seas are presented. The experiments related to influence on primary production by copper's (Cu) different concentrations were carried out in the conditions approached to natural ones during the voyages on Nikolay Kolomeytshev and Professor Shtokman research vessels. During 68 short-term toxicological onboard experiments the influence of some copper's additives on the value of primary production of seas' examined areas was studied.

Keywords: ecological toxicology, phytoplankton, primary production, toxicants, critical concentrations, Arctic and Subarctic seas.

В Минобрнауки России

В Минобрнауки России начинается разработка и обсуждение «моделей» эффективной деятельности научных учреждений в современных условиях. На основе разработанных «моделей» планируется подготовить проекты нормативных правовых актов, регулирующих деятельность научных институтов.

Для обсуждения предлагаются следующие темы: финансирование научных институтов; кадровая система; имущественный комплекс; научные исследования и экспертиза; другие темы.

Предложения учёных, преподавателей и заинтересованных граждан по вопросам формирования современных и эффективных «моделей» научных исследований можно оставить на сайте Общественного совета (http://sovet-edu.ru/discussions/-/message_boards/message/100573) и официальной странице Минобрнауки России в Живом Журнале. (<http://mon-ru.livejournal.com/69925.html>).

Источник: сайт Минобрнауки России