

УДК 574.52;574.58

ВЛИЯНИЕ МАРИКУЛЬТУРЫ МИДИЙ НА БЕНТОСНЫЕ И ПЛАНКТОННЫЕ СООБЩЕСТВА В БЕЛОМ МОРЕ

© 2008 г. И. М. Примаков¹, М. В. Иванов², П. А. Лезин¹, Э. Е. Кулаковский¹, А. А. Сухотин¹¹Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург²Санкт-Петербургский государственный университет

e-mail: wsbs@zin.ru

Поступила в редакцию 21.06.2006 г., после доработки 23.01.2007 г.

Исследованы структурные и функциональные характеристики планктонных и бентосных сообществ как в районах расположения промышленных мидиевых хозяйств (МХ) в Белом море, так и на свободных от марикультуры акваториях. Показано, что перераспределение органических веществ в пелагических и донных системах вблизи МХ ведет к изменениям структуры окружающих биоценозов. Потребление мидиями белка обуславливает резкое снижение относительной доли бактерий в планктонных сообществах в районах МХ, тогда как состав и численность зоопланктона не зависят от близости хозяйств. В донных биотопах наблюдается неравномерность распределения осадков по акватории, что приводит к увеличению органической нагрузки и, в некоторых случаях, к деградации бентосных сообществ.

Марикультура мидий – стремительно развивающаяся отрасль хозяйства во многих странах мира [14]. Многолетние исследования, выполненные Зоологическим институтом РАН, показали принципиальную возможность культивирования мидий (*Mytilus edulis* L.) в Белом море и легли в основу создания в данном регионе промышленной марикультуры этого моллюска [6, 7]. Масштабное культивирование предполагает резкое увеличение биомассы организмов (объекта выращивания и сопутствующих видов) на ограниченных акваториях, чаще всего, закрытых и полузакрытых бухт, что приводит к изменению круговорота веществ и потоков энергии в экосистемах. Мировой и отечественный опыт ведения марикультуры свидетельствует о необходимости изучения взаимоотношений массовых поселений объекта культивирования и представителей биоты в конкретных биотопах. Эти работы, наряду с другими, позволяют не только рассчитать величины нагрузок на данную акваторию и выход товарной продукции, но и прогнозировать возможные последствия влияния марикультуры на окружающую среду в целом. Задачей настоящего исследования было определить характеристики как планктонных, так и бентосных сообществ в местах промышленной марикультуры мидий в Белом море и сравнить эти параметры с контрольными значениями, полученными в акваториях, свободных от мидиевых хозяйств. Поставленная задача была реализована в рамках программы исследований РАН “Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами”.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал был собран в районе расположения экспериментально-промышленного мидиевого хозяйства (МХ) – в губе Никольская Кандалакшского залива Белого моря. В качестве контрольной акватории была взята открытая часть Кандалакшского залива. Структура материала разбивается на три блока: 1. пробы с мидиевых хозяйств – материал, характеризующий искусственные поселения моллюсков, как источник воздействия на окружающие системы; 2. пробы планктона для оценки состояния пелагиальных биоценозов и 3. донные пробы для описания бентосных сообществ и их абиотического окружения.

Отбор проб зоопланктона выполняли в 1999–2000 гг. сетью Джели с газом № 63 (размер ячеек 0.08 мм) и диаметром входного отверстия 36 см по двум горизонтам: 0–10 и 10–20 м. При глубинах менее 10 м осуществлялась протяжка сети от дна до поверхности. За исследуемый период было собрано и обработано более 70 проб. Биомасса зоопланктона была рассчитана по средним весам для отдельных стадий развития зоопланктонных организмов [3, 10].

Для оценки биомассы бактерио- и фитопланктона измеряли содержание белка по методу Лоури [17] и растительных пигментов (хлорофилла “а”) в морской взвеси. За 1999–2000 гг. было выполнено 25 измерений. Для расчета принималось, что среднее содержание хл “а” в сырой биомассе планктонных водорослей равно 0.25%, а среднее содержание белка в биомассе планктонных организмов составляет 2.5% [13]. Следовательно,

$$B_{bac} = \frac{[\text{Белок}]}{0.025} - B_{ph} = \frac{[\text{Белок}]}{0.025} - \frac{[\text{хл “а”}]}{0.0025},$$

где B_{bac} – биомасса гетеротрофного микропланктона (в основном – бактерий), а B_{ph} – биомасса планктонных водорослей.

Для ориентировочной оценки функционирования бактериопланктона, в 1999 г. в пробах воды определяли экстрацеллюлярную гидролитическую активность бактериальных ферментов (Extracellular Enzyme Activity, ЕЕА). ЕЕА, как скорость ферментативного расщепления субстрата с флюоресцентной меткой [19], определяли следующим образом. В воду добавлялся бактериальный субстрат из флюоресцин-ди-ацетата, после чего пробы экспонировали в течение суток, а концентрацию флюоресцина измеряли на флюориметре Labotron FFM 32. По скорости увеличения содержания флюоресцина в пробе рассчитывали эстеразную активность бактерий [16]. Всего было выполнено 16 съемок по 5–6 измерений в каждой.

Пробы мидий отбирали в 1998 г. на трех участках мидиевого хозяйства в губе Никольской, расположенных практически единым массивом. На каждом участке марикультуры выбирали от 3 до 5 станций (в центре и по краям участка). На станциях отбор мидий осуществляли с двух горизонтов искусственного субстрата – 0.5 и 2.5 м глубины. Пробой служили отрезки субстрата длиной 10 см. Мидий отделяли от субстрата, удаляли эпибионтов, промывали и определяли размер, массу и возраст каждой особи.

Для оценки количества органических веществ, выделяемых мидиями из данных участков марикультуры, было применено два подхода: расчетный и экспериментальный. Расчетный метод использует уравнения связи экскреторной активности мидий с линейным размером

$$F = 0.08L^{1.44},$$

где F – количество экскретов, мг сухой массы в сутки, L – длина раковины моллюсков, мм [8]. Суммарную экскреторную активность определяли, учитывая средний размер и численность мидий различных возрастов на субстратах, а также общее количество субстратов на изучаемых участках хозяйств. Кроме того, экскреция мидий была определена экспериментально с помощью седиментационных ловушек, установленных у дна на разных расстояниях от МХ на 1–3 суток.

Макрозообентос изучали с 1990 по 2001 гг. как непосредственно под промышленными мидиевыми хозяйствами (18 станций), так и на контрольных точках вне зоны их влияния (8 станций). В отдельные годы количество станций могло быть меньшим. На каждой станции брали по 3 дночерпательные пробы (1/40 м²). Организмы макрозообентоса в каждой пробе определяли преимущественно до вида, для каждого вида подсчитывали численность и находили суммарную биомассу. Для характеристики видового разнообразия бентосных сообществ на станциях использовали индекс Шеннона–Уивера. Рацион

отдельных таксонов макрозообентоса (C) рассчитывали, используя балансовое равенство:

$$C = \frac{P + R}{\alpha} = \frac{C_B \cdot B}{K_2 \cdot \alpha}.$$

Элементы балансового равенства определяли исходя из известных нам величин биомассы основных таксонов (B) и следующих показателей: удельная продукция ($C_B = 0.002–0.01$ для разных таксонов) [5], коэффициент чистой эффективности роста ($K_2 = 0.26$), усвояемость пищи ($\alpha = 0.6$) [2]. Общий рацион макрозообентоса оценивали как сумму рационов отдельных таксонов.

Бентосную съемку сопровождали отбором проб грунта для определения доли органического вещества и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) грунта. Содержание органических веществ определяли путем прокаливания осадков в муфельной печи при 520°C в течение 10 часов. Eh донных осадков измеряли непосредственно в дночерпателе, сразу после его подъема на борт судна. Измерения проводились в толще грунта на глубине 5 мм и 40 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные характеристики бактерио- и фитопланктонного сообществ в районах МХ и вне зоны их влияния представлены в таблице. Среднее отношение биомассы фитопланктона к биомассе бактериопланктона составляло 0.21 ± 0.04 в губе Никольская, где установлены промышленные МХ, и 0.08 ± 0.03 в открытых акваториях Кандалакшского залива, свободных от марикультуры. Следствием фильтрационного питания мидий является снижение пула белка на акватории губы Никольская, что в свою очередь приводит к уменьшению силы корреляционных связей между структурными характеристиками бактерио- и фитопланктона (рис. 1). Подтверждением этому могут служить данные, свидетельствующие о существенном (около 100 мг на 1 м³ воды) уменьшении содержания взвешенного белка при протекании воды через МХ [9]. Корреляция между биомассой бактерио- и фитопланктона и экстрацеллюлярной энзиматической активностью в губе Никольская также оказалась достоверно ниже, чем на открытых акваториях Кандалакшского залива [11, 12].

Показатели обилия зоопланктона были сходны на всех изучаемых акваториях. Везде по плотности доминировал циклоп *Oithona similis* и гарпактицида *Microsetella norvegica*, в то время как доминантами по биомассе являлись *O. similis* и *Pseudocalanus minutus*. Достоверные различия между открытой частью Кандалакшского залива и местами расположения МХ отмечены только в количественном составе мезопланктона. В губе Никольская личинки *Bivalvia* (в основном *Mytilus edulis*) являлись субдоминантной группой, и их количество более чем в четыре раза

Энзиматическая активность бактерий, биохимические компоненты морской взвеси и расчетная биомасса бактерио- и фитопланктона в губе Никольская (станции Н-1–Н-7) и на открытых акваториях Кандалакшского залива (станции VIII и Д-1)

Дата	Станция	ЕЕА, нмоль/мл/ч	Белок, мкг/л	хл "а", мкг/л	V_{bac} , мг/м ³	V_{ph} , мг/м ³
30.06.1999	Н-2	0.03	32.2	0.12	1240	48
	Н-4	0.08	18.4	0.13	687	50
	Н-7	0.20	13.2	0.17	462	67
14.07.1999	Н-1	0.02	48.9	0.34	1818	137
	Н-4	0.02	21.7	0.53	658	212
	Н-7	0.05	14.9	0.46	411	185
04.08.1999	Н-5	–	34.0	0.33	1227	132
	Н-6	–	51.0	0.66	1777	262
07.09.1999	Н-1	0.04	33.2	1.14	869	458
	Н-4	0.61	50.1	1.29	1488	515
	Н-7	0.63	37.9	0.91	1154	363
19.07.1999	VIII	0.07	115.5	0.23	4526	92
11.10.1999	VIII	0.03	32.2	0.00	1289	0
09.07.1999	Д-1	0.02	92.3	0.23	3600	92
19.07.1999	Д-1	0.03	117.4	0.34	4558	136
29.08.1999	Д-1	0.18	190.0	1.20	7120	480
28.09.1999	Д-1	0.04	153.5	0.88	5787	352
10.10.1999	Д-1	0.05	69.0	0.00	2758	0
05.08.2000	Н-4	–	80.2	1.04	2792	416
15.08.2000	Н-7	–	70.6	0.44	2647	176
28.06.2000	Д-1	–	84.2	0.48	3177	192
01.08.2000	Д-1	–	77.9	0.48	2925	191
09.08.2000	Д-1	–	72.3	0.78	2578	312
21.08.2000	Д-1	–	202.8	2.36	7168	945
30.08.2000	Д-1	–	109.6	2.81	3260	1124

превышало таковое на открытых акваториях залива [11, 12].

Численность мидий на одном погонном метре искусственных субстратов изученных хозяйств варьировала от 600 до 800 особей. При общей биомассе мидий на субстратах 3 участка хозяйства в Никольской губе (площадью 6 гектар) около 200 тонн сырой массы, в акваторию поступает около 350 кг сухой массы взвешенного органического вещества в сутки. Принимая, что период активного метаболизма беломорских мидий составляет около 4 месяцев теплого времени, можно рассчитать, что с изученных участков в окружающую среду за год поступает около 40 тонн сухих органических веществ, что в пересчете на один гектар хозяйства составляет 6.5 тонн. Эта цифра примерно вдвое меньше по сравнению с указанной для черноморских культивируемых мидий – около 12 тонн сухого органического вещества с гектара в год [1], что легко объяснить гораздо более длительным периодом активной жизнедеятельности моллюсков в Черном море. В среднем величины осадконакопления сухих органических веществ в районе хозяйств составляют 3 ± 0.4 г/м²/сут. При этом осадки аккумулируются непосредственно под хозяйством и в прилегающей 75-метровой зоне в направлении приливно-отливного течения и увеличения глубины. Были исследованы три возможности утилизации органических веществ, привнесенных в акваторию в результате функционирования МХ: поедание организмами бентоса, химическое и

биохимическое окисление, и захоранивание не полностью минерализовавшихся органических веществ в толще грунта. В дночерпательных пробах нами было отмечено 64 видовых и надвидовых таксонов макрозообентоса. Рацион животных макробентоса в зоне основного осаднения осадка составлял 2 ± 0.7 г сух. орг. в-в/м²/сут, тогда как поступление осадка было около 3 г сух. орг. в-в/м²/сут. На контрольных станциях, вне зоны основного осаднения

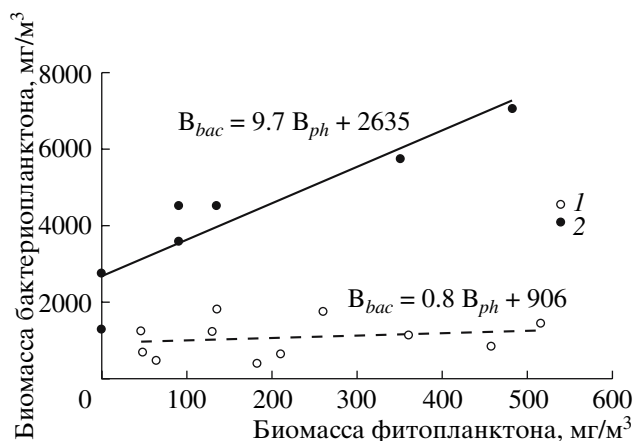


Рис. 1. Связь между биомассами бактерио- и фитопланктона. 1 – акватория хозяйства марикультуры мидий (губа Никольская), 2 – открытая часть Кандалакшского залива.

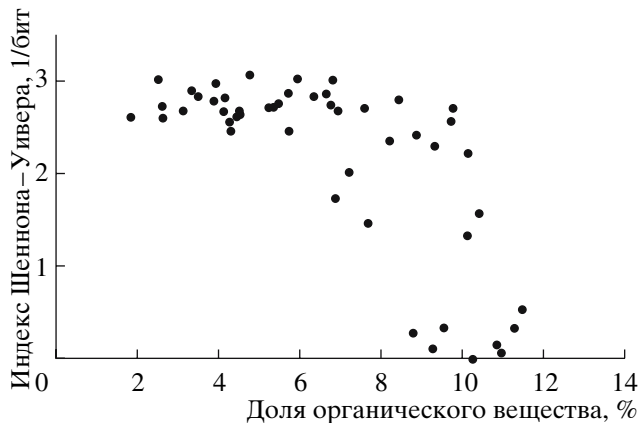


Рис. 2. Зависимость индекса Шеннона-Уивера сообществ макробентоса в районе хозяйств марикультуры от содержания органических веществ в грунте.

рацион макробентоса составлял 0.15 ± 0.03 г сух. орг. в-в/м²/сут, а поступление осадка 0.75 ± 0.15 г сух. орг. в-в/м²/сут. Следовательно, макробентос под МХ способен утилизировать до двух третей осаждающихся органических веществ. Бентосные сообщества расположенные дальше от МХ обладают значительно более скудным рационом, что хорошо связывается с уменьшением поступления осадков от МХ.

Часть осадков от мидиевых хозяйств, которая не была потреблена макробентосом, подвергается процессам химического и биологического окисления. Об активности этих процессов можно судить по величине окислительно-восстановительного потенциала грунта (Eh). На станциях, лежащих за пределами активного поступления осадков с МХ, величины Eh на поверхности и в глубине были высоко положительными и однозначно свидетельствовали об окислительных условиях и наличии свободного кислорода: 396 ± 16 мВ на поверхности и 307 ± 28 мВ на глубине 40 мм. На станциях, расположенных под действующими участками МХ, на поверхности Eh было равно 194 ± 14 мВ, а на 40 мм – 98 ± 10 мВ. Это значит, что условия в толще грунта характеризуются переходным режимом, весь кислород тратится на окисление органических веществ, и возникает ситуация, когда часть поступивших осадков не успевает полностью минерализоваться и, в условиях дефицита кислорода, захоранивается. На контрольных станциях и на ряде станций, находящихся под МХ, концентрация органических веществ в грунте находилась в пределах 2–5%. Сообщества бентоса в этих местах характеризовались резким преобладанием моллюсков, таких как *Arctica islandica*, *Elliptica elliptica*, *Macoma calcarea*, доля которых в общей биомассе составляла около 50%. При концентрации органических веществ в грунте от 4 до 7% снижается доля моллюсков и возрастает доля полихет. Концентрации органических веществ в грунте близкие к 9% и более приводят к резким изменениям состава сообществ. Основным доминирующим видом становятся полихеты *Capitella capitata* (70–

80%) и субдоминирующим – *Scalibregma inflation*, в сумме эти два вида дают 85–93% всей биомассы. Таким образом, по мере увеличения концентрации органических веществ в грунте последовательно сменяются несколько видов-доминантов, уменьшается доля моллюсков в биомассе и возрастает доля полихет.

Говоря о влиянии МХ на бентосные сообщества, следует отметить, что дополнительное поступление и накопление органических веществ в осадках под МХ, в условиях хорошей аэрации, не приводит к снижению видового разнообразия бентосных сообществ (рис. 2) – диапазон концентрации от 2 до 8% органических веществ в грунте. Подобные явления отмечались и в других регионах [4, 20]. В тех случаях, когда весь кислород из придонного слоя воды и осадка расходуется на минерализацию органических веществ, на дне развиваются заморные явления, что приводит к деградации бентосного сообщества (на рис. 2 см. ряд станций в диапазоне более 8% органических веществ). Подобное воздействие МХ на бентос было отмечено для Северного моря [18].

Таким образом, если принять, что органическая нагрузка – это поступление в систему дополнительных аллохтонных нетоксических органических веществ, то можно выделить две фазы воздействия этой нагрузки. В первой фазе: структура сообществ изменяется, но при этом общие функциональные показатели остаются практически стабильными или увеличиваются, воздействие МХ проявляется в изменении трофической структуры сообщества и гранулометрического состава осадков. Во второй фазе: наблюдается резкое падение структурных и функциональных показателей – сообщества деградируют, воздействие МХ осуществляется через снижение концентрации кислорода. Предельная концентрация органических веществ в грунте для наступления второй фазы органической нагрузки зависит от условий аэрации придонных слоев воды [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поселения мидий, создаваемые в результате промышленного культивирования, значительно превосходят по показателям обилия любые природные популяции этих моллюсков. В процессе жизнедеятельности мидии эффективно отфильтровывают из воды seston, включающий в себя детрит, фито- и бактериопланктон, и служащий моллюскам пищей. При этом, часть органического вещества возвращается в экосистему в виде фекалий и псевдофекалий, а также в растворенном виде. Перераспределение органических веществ в пелагических и донных системах в непосредственной близости от промышленных хозяйств по культивированию мидий ведет к изменениям структуры окружающих биоценозов. Нами показано, что выедание мидиями белка приводит к резкому снижению относительной доли бактерий в планктонных сообществах в районах МХ, то-

гда как состав и численность зоопланктона не зависят от близости хозяйств. В донных биотопах наблюдается неравномерность распределения осадков по акватории и, соответственно, органической нагрузки на бентосные сообщества. Макробентос под МХ способен утилизировать более половины поступающих органических веществ. Воздействие органической нагрузки на бентосные сообщества можно разделить на два этапа: на первом происходит смена доминирующих групп, но общие характеристики сообществ мало меняются или увеличиваются; на втором происходит деградация сообществ. Таким образом, наши исследования опровергают существующее мнение об исключительно благоприятном воздействии аквакультуры двустворчатых моллюсков на окружающую среду [15] и демонстрируют неоднозначное, и, в ряде случаев негативное влияние МХ на пелагические и донные биоценозы.

Для эффективного управления аквакультурой двустворчатых моллюсков требуется системный подход в изучении биотических взаимоотношений в морских экосистемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абаев В.Ю.* Влияние культивируемых мидий на экосистемы Анапского шельфа Черного моря / Автореф. канд. дисс. Краснодар, 2001. 18 с.
2. *Алимов А.Ф.* Введение в продукционную гидробиологию. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 151 с.
3. *Богоров В.Г.* Веса и экологические особенности макропланктона Баренцева моря // Тр. ВНИРО. 1939. Т. 4. С. 245–258.
4. *Гальцова В.В., Павлюк О.Н., Левин В.С.* Воздействие марикультуры *Patinopecten yessoensis* на мейобентос в бухте Алексея Японского моря // Тез. Докл. IV всесоюзной конф. по промысловым беспозвоночным. М.: ВНИРО, 1986. С. 27–28.
5. *Заика В.Е.* Сравнительная продуктивность гидробионтов. Киев: Наукова думка, 1983. 206 с.
6. *Кулаковский Э.Е.* Биологические основы марикультуры мидий в Белом море // Исследования фауны морей. Вып. 50(58). СПб.: Изд-во ЗИН РАН, 2000. 168 с.
7. *Кулаковский Э.Е., Житний Б.Г., Газдиева С.В.* Культивирование мидий на Карельском побережье Белого моря. Петрозаводск, 2003. 159 с.
8. *Максимович Н.В., Миничев Ю.С., Кулаковский Э.Е. и др.* Динамика структурных и функциональных характеристик поселений беломорских мидий в условиях подвесного выращивания // Исследования по марикультуре мидий на Белом море. СПб.: Изд-во ЗИН РАН, 1993. С. 61–82.
9. *Маслов Ю.И.* Морская взвесь как кормовая база при культивировании мидий // Изучение опыта промышленного выращивания мидий в Белом море. Тр. БиНИИ. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. Вып. 46. С. 144–154.
10. *Перцова Н.М.* Средние веса и размеры массовых видов зоопланктона Белого моря // Океанология. 1967. Т. 2. Вып. 2. С. 309–313.
11. *Примаков И.М.* Структурно-функциональные характеристики основных компонентов планктонного сообщества Кандалакшского залива Белого моря // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2005. Сер. 3. Вып. 1. С. 67–70.
12. *Примаков И.М., Лезин П.А., Иванов М.В., Кулаковский Э.Е.* Пути оптимизации марикультуры мидий в Белом море. М.: КМК, 2006. 72 с.
13. Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений / Под ред. Цыбань А.В. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 192 с.
14. FAO. Aquaculture production 1970–1999. Fishstat Plus (v. 2.30) Food and Agricultural Organisation, United Nations, Rome. 2001.
15. *Gosling E.M.* Bivalve Molluscs. Biology, Ecology and Culture. Fishing News Books. Oxford, 2003. 443 p.
16. *Hoppe H.-G.* Use of fluorogenic model substrates for extracellular enzyme activity (EEA) measurement of bacteria // Handbook of methods in aquatic microbial ecology. 1993. P. 423–431.
17. *Lowry O.W., Rosenbrough N.T., Farr A.L.* Protein measurement with the Folin phenol reagent // J. Biol. Chem. 1951. V. 193. № 1. P. 265–275.
18. *Mattsson J., Linden O.* Benthic macrofauna succession under mussels, *Mytilus edulis* L. (Bivalvia), cultured on hanging long-lines // Sarsia. 1983. V. 68. № 2. P. 97–102.
19. *Richardot Debroas D., Thouvenot A., Romagoux J.C. et al.* Proteolytic and glycolytic activities in size-fractionated surface water samples from an oligotrophic reservoir in relation to plankton communities // Aquatic Sciences. 1999. V. 61. P. 279–292.
20. *Veer H.W.* Eutrophication and mussel culture in the western Dutch Wadden Sea: impact on the benthic ecosystem; hypothesis // Helgoland. Meeresuntersuch. 1989. V. 43. № 3–4. P. 517–527.

The Influence of Aquaculture of Mussel on Benthic and Planktonic Communities in the White Sea

I. M. Primakov, M. V. Ivanov, P. A. Lezin, E. E. Kulakowski[†], A. A. Sukhotin

Structural and functional parameters of plankton and benthic communities were studied in the White Sea both in the sites of industrial mussel cultivation farms (MF) and in the aquaculture free area. Redistribution of organic matter in pelagic and bottom systems close to MF was shown to result in the changes of the structure of the surrounding biocenoses. Consumption of proteins by mussels led to a drastic decrease in the relative abundance of planktonic bacteria, while zooplankton community composition and abundance were not affected by MF. Significantly uneven distribution was found in the bottom habitats, which results in organic contamination and in some cases in the degradation of benthic communities.