

УСЛОВИЯ ВОСПРОИЗВОДСТВА ПРОМЫСЛОВЫХ ГИДРОБИОНТОВ

УДК 639.41

DOI: 10.36038/0234-2774-2025-26-3-83-98

EDN HTWJUK

**ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЧИСЛЕННОСТЬ
ПЕЛАГИЧЕСКИХ ЛИЧИНОК ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ
В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ**

© 2025 г. Д.Д. Габаев (spin: 8134-1606), Н.К. Колотухина

Национальный Научный Центр морской биологии
им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток 690041, Россия
E-mail: gabaevdd@mail.ru

Поступила в редакцию 15.04.2025 г.

Результаты обработки планктонных проб, взятых в сентябре-октябре 2016 г. в 48 рейсе НИС «Академик Опарин» в Чукотском море обнаружили высокую численность пелагических личинок двустворчатых моллюсков с 22 сентября по 1 октября. До рода и вида было определено девять видов. По критерию Пирсона обилие двух из них (*Serripes groenlandicus* и *Hiatella arctica*) достоверно отрицательно было взаимосвязано с концентрацией кремния в воде ($r = -0,4085$ и $r = -0,3973$ соответственно) и концентрацией кислорода у дна ($r = -0,5175$ и $r = -0,5917$ соответственно). На численность *Mya* spp., *Macra* spp. и *Hiatella arctica* достоверно положительно оказывала концентрация хлорофилла – а (chl) ($r = 0,4175$; $r = 0,5414$ и $r = 0,4680$ соответственно). На обилие *Zirfaea* spp. и *Chlamys* spp. достоверно положительно оказывала температура воды у поверхности ($r = 0,4604$ и $r = 0,4574$ соответственно). Численность *Macoma* spp. достоверно положительно была взаимосвязана с рН среды ($r = 0,4316$), а *Macra* spp. – достоверно отрицательно ($r = -0,5343$). Дисперсионный анализ (ДА) обнаружил в два раза больше достоверных взаимосвязей численности личинок со средой чем критерий Пирсона. Самая «урожайная» акватория была у Берингова пролива и на банке Геральда.

Ключевые слова: Чукотское море, пелагические личинки двустворчатых моллюсков, пространственное распределение, факторы среды.

ВВЕДЕНИЕ

Чукотское море отличается от Восточно-Сибирского не только гидрологическими условиями, но и своеобразным составом донного населения (Ушаков, 1952). Наблюдаемое многие годы потепление (Walter et al., 2002; Philippart et al., 2003; Crane, Ostrovskiy, 2009; Stübner, 2016; Michelsen, 2017) способствует привлекательности арктических морей, среди которых Чукотское море одно из самых продуктивных в мире (Сиренко, Гагаев, 2007; Денисенко и др., 2010, Ильяш, 2016 (личное сообщение)). Потепление климата способствует развитию Северного морского пути, извлечению полезных ископаемых, а также использованию животного мира. Двустворчатые моллюски являются кормовой базой

для многочисленных потребителей Чукотского моря – китов, тюленей, моржей, рыб и крупных крабов (Зонн и др., 2013). Некоторые из них (*Chlamys* spp., *Mya* spp., *M. trossulus* и *H. arctica*) являются обрастателями искусственных субстратов, и в том числе нефтяных платформ, эксплуатация которых зависит от их обилия. После исследований, проведённых в первой половине прошлого века, интерес к этому морю опять возрос, стимулированный возможностью судоходства и добычи нефти. Поступающие в Чукотское море водные массы представлены аляскинским, берингоморским и анадырским течениями, каждое со своим уникальным сообществом и количеством зоопланктона (Котенев, 1995; Coyle et al., 1996; Hopcroft et al., 2010). Тече-

ния приносят в Чукотское море приблизительно 85 м³ в секунду морской воды Берингова моря (Coachman, Aagaard, 1974), в которой содержится около 1,8 млн метрических т зоопланктона (Springer et al., 1989). Столкновение тёплых вод Берингова моря с холодными водами Чукотского приводит к массовой гибели теплолюбивого зоопланктона, вместе с фитопланктоном обогащающего бентос органическим материалом (Книпович, 1938).

На Чукотском шельфе в зимний сезон у температуры и солёности есть межгодовые различия, и в том числе в трёхмерном пространстве (Weingartner et al., 2005). Различия во времени таяния льда, температуре воды, транспорте водных масс, питательных веществ и (*chl*) объясняют межгодовые изменения состава и численности планктонных сообществ (Questel et al., 2013). Локальное же проникновение в Чукотское море относительно тепловодных тихоокеанских видов: крабов *Telmessus cheiragonus*, *Oregonia grasilis* и двустворчатого моллюска *Pododesmus macrrochisma* подкрепляют доказательства его потепления (Сиренко, Гагаев, 2007).

Таким образом, потенциальными последствиями изменения климата для бентоса Чукотского моря могут быть изменения в его видовом составе и численности (Grebmeier, 2012), и в тёплые годы возможно улучшение условий воспроизводства у многих беспозвоночных (Berge et al., 2005; Renaud et al., 2015). Сказанное определяет актуальность постоянного контроля за состоянием планктонных сообществ Чукотского моря (Michelsen, 2017; Brandner et al., 2017).

Целью представленной работы стал поиск факторов, влияющих на воспроизводство двустворчатых моллюсков Чукотского моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

48-й рейс НИС «Академик Опарин» был продолжительностью 48 сут. – с 2 сентября по 19 октября 2016 г. С 12 сентября по 6 октября 2016 г. работы велись в Чукотском и Беринго-

вом морях. В ходе экспедиции на 30 станциях планктонной сетью Норпак с диаметром входного отверстия 39 см и ячейей 150 мкм брали пробы меропланктона (табл. 1). Как правило, сеть Норпак опускали на глубину 15 м. Сразу после взятия проб их фиксировали 4%-м раствором забуференного формальдегида, а перед исследованием промывали и фиксировали 90%-м этанолом. Обработку проб проводили с помощью камеры Богорова и микроскопа МБС-10. В пробе определяли и просчитывали общее количество следующих личинок двустворчатых моллюсков: *Zirfaea* spp., *Kellia* spp., *Macoma* spp., *Macra* spp., *Mya* spp., *Serripes groenlandicus* (Bruquiere, 1789), *Chlamys* spp., *Hiatella arctica* (Linnaeus, 1767), *Mytilus trossulus* (Gould, 1850) и пересчитывали количество на 1 м³. Планктонная проба на станции 0 не учитывалась из-за плохой сохранности. Пробы воды на биохимический анализ брали батометром Нискина.

Данные по минеральным формам биогенных элементов, включающих фосфор, несколько форм азота (нитраты, нитриты, аммиак), кремний, кислород, содержащее фитопигментов – (*chl*), а также температуру воды на поверхности и у дна были получены от сотрудницы ННЦМБ ДВО РАН к.х.н. Л.Н. Пропп. Основные же параметры водной среды определяли с помощью зонда – профилографа SEACAT Profiler CTD модели SBE 19plus V2 производства компании Sea-Bird Electronics, Inc., предназначенного для непрерывного автоматического измерения ряда параметров морской воды: глубины, температуры, солёности, концентрации кислорода, степени насыщения воды кислородом, (*chl*) и pH среды.

Материалом для этой публикации послужили данные, собранные в вышеупомянутом рейсе. Представлено пространственное распределение исследованных видов в западной части Чукотского моря и его взаимосвязь с климатическими факторами. Проведено статистическое сравнение факторов с обилием личинок на трёх станциях с низкой суммарной

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЧИСЛЕННОСТЬ

Таблица 1. Информация о экспедиционных наблюдениях в западной части Чукотского моря в сентябре-октябре 2016 г.

Дата	№ Станции	Широта	Долгота	Глубина, м	Суммарная численность личинок, экз./м ³	O ₂ на поверхности	O ₂ у дна	Т°С на поверхности	Т°С у дна
12.09.16	0	68.19.	172.51	50	833	6,37	3,04	7,0	1,4
14.09.16	1	71.21	175.37	36	217	7,67	7,31	3,1	-1,4
16.09.16	2	71.03	177.46	15	68	8,36	7,94	0,6	0,7
19.09.16	3	70.53	179.50	12	70	7,78	6,86	0	-0,1
19.09.16	4	70.54	179.55	10	38	7,77	7,86	0,2	0,2
19.09.16	5	70.5	179.42	18	600	7,68	7,72	0,9	0,02
19.09.16	6	70.31	177.26	50	778	7,78	5,09	2,3	-1,6
20.09.16	7	71.05	177.36	10	80	7,71	7,73	0,7	0,6
21.09.16	8	71.11	175.54	44	19	7,86	5,82	2	-1,6
21.09.16	10	71.13	174.5	95	828	7,59	5,02	2,6	-1,7
22.09.16	11	71.2	173.05	50	79	7,94	5,55	0,9	-0,2
22.09.16	12	70.32	173.05	42	4987	7,15	4,03	3,8	1,5
23.09.16	13	70.32	172.05	20	1330	6,68	6,85	3,9	5
23.09.16	14	69.54	171.1	42	218	6,96	7,08	5	-0,5
24.09.16	15	69.01	169.16	50	790	7,04	6,53	5,9	1,1
24.09.16	16	68.11	169.1	58	3200	6,68	4,46	6,7	2,7
25.09.16	17	67.26	169.37	50	12400	7,04	2,83	5,1	2,6
25.09.16	18	67.31	171.22	48	4865	6,53	2,28	5,5	2,3
25.09.16	19	67.27	172.33	48	2000	7,27	3,22	4,6	3,1
26.09.16	20	67.26	173.45	30	194	7,27	4,16	3,8	3,8
26.09.16	21	67.32	173.37	42	144	7,31	4,22	4,1	-0,5
27.09.16	22	67.14	173.39	20	61			5,5	
28.09.16	23	67.7	173.46	45	44			5,5	
01.10.16	24	67.07	173.46	21	194	6,53	4,78	4,3	2,6
01.10.16	25	67.39	173.24	45	4052	7,08	3,8	4,2	1,5
02.10.16	26	67.03	173.6	12	644			5	
03.10.16	27	68.18	172.50	50	118	6,37	3,04	3,7	2,7
04.10.16	28	66.45	169.03	46	33	6,53	6,45	6,7	4,5
05.10.16	29	65.42	169.24	48	181	6,45	6,53	6,5	4,2
06.10.16	30	64.21	173.23	23	749				

численностью личинок («бедных») (4, 8 и 23 – менее 50 экз./м³) и на трёх «богатых» станциях (12, 17 и 18 – более 4000 экз./м³) (рис. 1, табл. 1). Статистический анализ материала проводили с помощью программы STATISTICA 6 (Боровиков, 2003) и тестировали на уровне

$\alpha = 0,05$. Меру зависимости обилия личинок от климатических факторов определяли с помощью коэффициент корреляции Пирсона. Для компенсации недостатков этого коэффициента, анализа главных компонент (РСА) и увеличения наглядности по сравне-

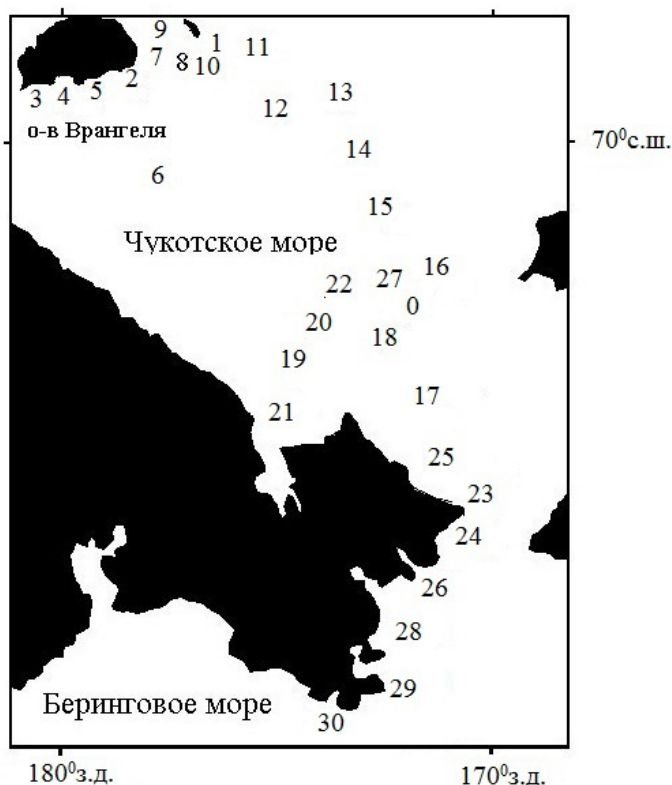


Рис. 1. Карта – схема расположения станций отбора планктонных проб в Чукотском море (цифры – номера станций). Координаты и глубина указаны в таблице 1.

нию с регрессионным анализом использовали непараметрическое многомерное масштабирование (nMDS) (Clarke et al., 2014). Его проводили на матрице расстояний сходства между образцами с помощью индексов Брея-Кертиса, построенной факторным анализом таблицы 2 и материалов климатических параметров. Для проведения теста на значимость различий между группами использовали Дисперсионный анализ (ДА) (Боровиков, 2003). Графический материал был создан с помощью Surfer 7 и Excel 2007.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Абиотические факторы среды

На исследованной акватории лёд вынесло только в августе. Термоклин на «бедной» мелководной станции (ст. 4) не был замечен, а на глубоководных ст. 8 и ст. 23 скачок температуры достигал 2–3°C вплоть до отрицательных значений у дна (ст. 8). Галоклин на ст. 4

и ст. 23 находился на 4 и 5 м соответственно, а на ст. 8 он отсутствовал (рис. 2). Однако на «богатых» станциях температура демонстрировала либо синхронную с солёностью изменчивость и асинхронность глубже 30 м (ст. 12), либо была практически зеркальным отражением профилей температуры с выраженными термо и галоклинами при положительной температуре (рис. 2).

Концентрация кислорода на «бедной» мелководной ст. 4 увеличивалась с глубиной от 6,4 до 6,5 мл/л, на ст. 23 увеличивалась от 5,0 до 5,7 мл/л, а на ст. 8 падала от 6,8 до 4,3 мл/л. На этих станциях изменение рН среды с глубиной показывала либо противоположную с кислородом динамику (ст. 4 и ст. 23), либо синхронную (ст. 8). В то же время все «богатые» станции демонстрировали синхронность рН и кислорода с резким уменьшением последнего на глубинах более 25–30 м – от 6 до 2,2–3,8 мл/л (ст. 12, 17 и 18) (рис. 3).

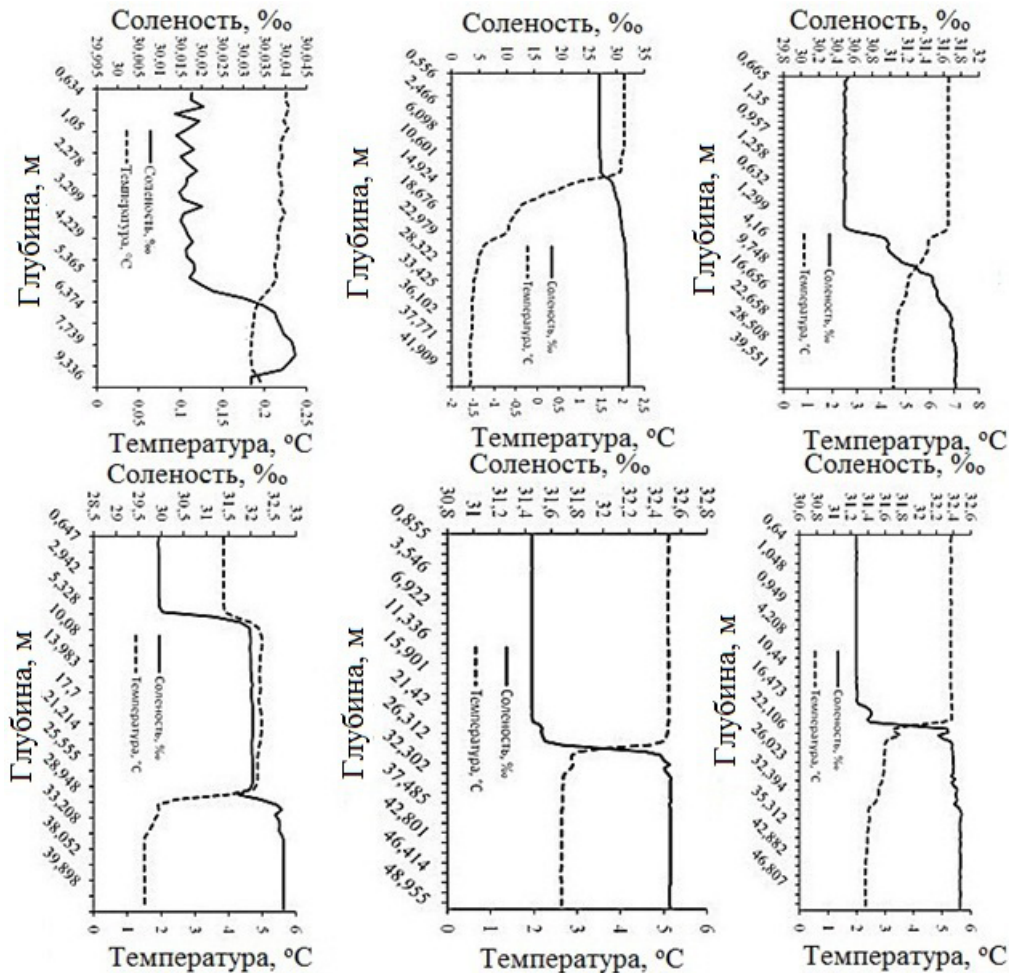


Рис. 2. Профили температуры и солености на «бедных» станциях № 4, 8 и 23 – верхний ряд и на «богатых» станциях № 12, 17 и 18 – нижний ряд.

Изменчивость концентраций кислорода и (*chl*) с глубиной на «бедных» станциях демонстрировала большое сходство (ст. 4 и ст. 23) и лишь незначительное расхождение в профилях этих параметров наблюдалось на ст. 8. На этих станциях концентрация (*chl*) с глубиной, как правило, увеличивалась. В то же время на «богатых» станциях в динамика концентраций кислорода и (*chl*) наблюдалось постоянное сходство с резким уменьшением обоих параметров после 22–35 м (рис. 4).

На мелководных станциях (с 1 по 5, и 7) создавались благоприятные условия для развития фитопланктона, и, как следствие, концентрация кислорода у дна там на 3–10% превышала наблюдаемую у поверхности (табл. 1). На акваториях с глубинами до 50 м, располо-

женных западнее основного стержня течения, шло интенсивное осадконакопление. Там на «богатых» станциях 12, 17 и 18 слой скачка температуры опускался до 30 м, ниже которых в результате деструкции органического материала происходило поглощение кислорода, снижающего его концентрацию до 3,69 – 2,23 мл/л, что в 1,5– 2,5 раза ниже, чем у поверхности (табл. 1).

Распределение биогенных элементов зависело от биологических процессов, и их поглощение водорослями в процессе жизнедеятельности снижало их концентрацию у поверхности. На «бедных» станциях концентрация фосфора с глубиной либо увеличивалась (ст. 4 и ст. 23), либо уменьшалась почти в два раза (ст. 8). Однако на всех «богатых»

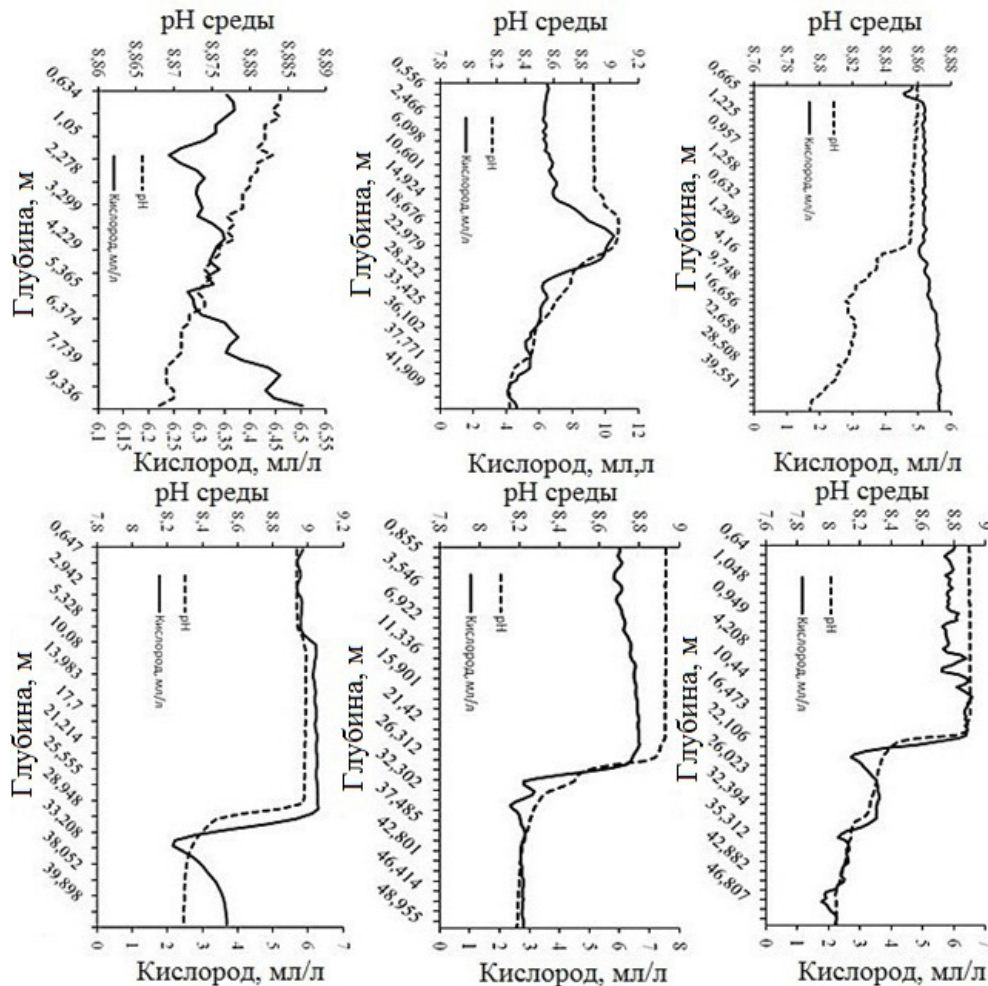


Рис. 3. Профили *pH* среды и кислорода на «бедных» станциях № 4, 8 и 23 – верхний ряд и на «богатых» станциях № 12, 17 и 18 – нижний ряд.

станциях концентрация фосфора с глубиной увеличивалась до значений, близких 2,8–3 μM . Нитриты на «бедных» станциях либо отсутствовали (ст. 23), либо демонстрировали близкие к нулю концентрации (ст. 4 и ст. 8). На «богатых» станциях 17 и 18 их концентрация также была нулевой, и только на ст. 12 она увеличивалась до 0,86 μM .

Концентрация нитратов на «бедных» станциях, кроме ст. 4, с глубиной возрастала до 4,4 и 9,5 μM (ст. 23 и ст. 8 соответственно). Однако их рекордная концентрация у дна была обнаружена на «богатых» ст. 18 и ст. 12 – от 10,2 до 11,7 μM соответственно. Концентрация аммиака на «бедной» ст. 4 с глубиной либо не увеличивалась, либо увеличивалась не более, чем в 5 раз (ст. 8 и ст. 23). В то время

как на «урожайной» ст. 17 она была либо нулевой, либо значительно увеличивалась: от 0 до 6,3 μM на ст. 12 и от 0 до 11,1 μM на ст. 18. Причём на ст. 18 различие в содержании биогенных элементов между поверхностью и дном достигало максимальных значений. Концентрация кремния на «бедных» ст. 4 и ст. 23 с глубиной слабо увеличивалась, а на ст. 8 снижалась в 11 раз. Эти результаты в значительной степени отличались от данных, полученных на «богатых» станциях, где концентрация кремния с глубиной увеличивалась от 12 до 57 раз.

Личинки двусторчатых моллюсков

Максимальное количество личинок двусторчатых моллюсков оказалось на станциях 12, 16, 17 и 18 (табл. 1, табл. 2).

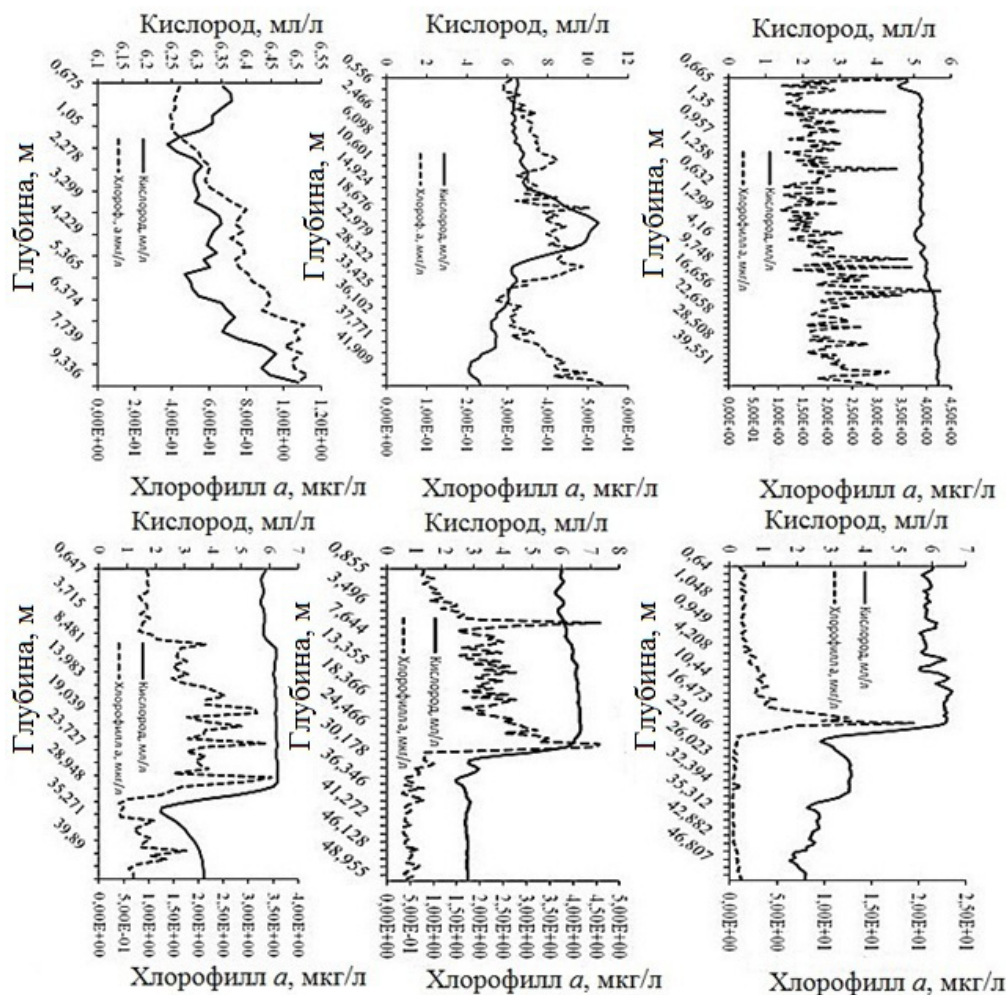


Рис. 4. Профили хлорофилла – а (*chl*) и кислорода на «бедных» станциях № 4, 8 и 23 – верхний ряд и на «богатых» станциях № 12, 17 и 18 – нижний ряд.

Обилие *Serripes groenlandicus* и *Hiatella arctica* достоверно отрицательно было взаимосвязано с концентрацией кремния ($r = -0,4085$ и $r = -0,3973$ соответственно) и концентрацией кислорода у дна ($r = -0,5175$ и $r = -0,5917$ соответственно) (табл. 3). На численность *Mya* spp., *Macra* spp. и *Hiatella arctica* достоверно положительное воздействие оказывала концентрация (*chl*) ($r = 0,4175$; $r = 0,5414$ и $r = 0,4680$ соответственно) (табл. 3). Обилие *Zirfaea* spp. и *Chlamys* spp. достоверно положительно было взаимосвязано с температурой воды у поверхности ($r = 0,604$ и $r = 0,4574$ соответственно) (табл. 3). На численность *Masota* spp. достоверно положительное воздействие оказывала pH среды ($r = 0,4316$), а на численность *Macra* spp. – достоверно отри-

цательное ($r = -0,5343$) (табл. 3). Численность *Kellia* spp. и *Mytilus trossulus* не была достоверно взаимосвязана с вышеперечисленными факторами среды (табл. 3).

В дополнение к критерию Пирсона, дисперсионный анализ (ДА) обнаружил достоверную взаимосвязь обилия личинок *Chlamys* с широтой на станциях, а у *Macra* – с глубиной (табл. 3 и 4). Однако на концентрацию (*chl*) в (ДА) достоверно реагировало в три раза меньше видов, чем у критерия Пирсона и только для *Hiatella* результаты совпали (табл. 3 и 4). Критерий Пирсона не обнаружил ни одного вида, достоверно связанного с растворённым углеродом, а (ДА) обнаружил её с двумя видами (табл. 3 и 4). Температура воды у поверхности по критерию Пир-

Таблица 2. Численность личинок двустворчатых моллюсков в Чукотском море (экз./м³)

Дата	Станции	<i>Kellia</i>	<i>Serripes</i>	<i>Hiatella</i>	<i>Zirfaea</i>	<i>Mya</i>	<i>Macoma</i>	<i>Mytilus</i>	<i>Chlamys</i>	<i>Macra</i>
14.09.16	1	0	13	5	0	5	85	0	0	0
16.09.16	2	1	23	1	0	1	12	0	0	0
19.09.16	3	0	30	6	0	2	3	0	0	0
19.09.16	4	0	17	1	0	4	4	0	0	0
19.09.16	5	0	38	18	0	1	9	0	0	0
19.09.16	6	6	65	53	0	12	420	0	0	6
20.09.16	7	7	10	4	0	3	28	0	0	0
21.09.16	8	0	4	3	0	0	4	0	0	0
21.09.16	10	30	73	60	0	55	68	3	0	0
22.09.16	11	4	24	9	0	4	17	2	0	0
22.09.16	12	163	167	373	0	275	277	13	0	0
23.09.16	13	60	180	80	0	203	133	13	0	0
23.09.16	14	11	13	3	1	0	0	0	0	0
24.09.16	15	42	15	17	18	82	258	4	28	24
24.09.16	16	17	7	867	7	0	43	0	38	0
25.09.16	17	0	880	2000	0	200	40	0	0	0
25.09.16	18	0	460	4120	0	60	0	3	0	0
25.09.16	19	0	43	130	0	17	520	4	0	0
26.09.16	20	0	18	60	0	25	3	2	2	0
26.09.16	21	0	8	29	0	43	1	0	0	0
27.09.16	22	0	6	28	0	13	1	0	0	2
28.09.16	23	0	0	8	0	6	0	0	0	0
01.10.16	24	0	8	68	10	13	0	0	0	0
01.10.16	25	17	160	427	0	480	10	10	0	227
02.10.16	26	0	6	97	0	60	6	10	0	0
03.10.16	27	0	8	56	0	31	4	4	1	0
04.10.16	28	0	0	7	5	0	0	1	2	0
05.10.16	29	0	10	69	0	7	9	2	1	0
06.10.16	30	0	0	2	12	0	0	0	0	0

сона достоверно положительно взаимосвязана с двумя видами, а по (ДА) – с одним. Однако в отличие от критерия Пирсона, показавшего отсутствие взаимосвязи с температурой воды у дна у всех видов, (ДА) анализ обнаружил её с шестью видами (табл. 3 и 4). В целом, критерий Пирсона обнаружил в два раза меньше достоверных взаимосвязей численности личинок со средой чем (ДА) (11 и 22 связи соответственно).

nMDS анализ взаимосвязи между климатическими факторами показал, что с широ-

той акватории хорошо взаимосвязана температура у дна и у поверхности, а также на солёность и концентрация (*chl*) (рис. 5а). Несмотря на отсутствие значимого коэффициента корреляции Пирсона широты и глубины акватории с пространственным распределением личинок (табл. 3), (nMDS) показал существенную связь широты с *Macra*, а глубины – с *Kellia* и *Macoma* (рис. 5б). Однако эти два анализа близки для *Hiatella* и *Serripes*; для *Mya* и *Macra*, и для *Chlamys* и *Zirfaea* (табл. 3, рис. 5в). Результаты nMDS анализа

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЧИСЛЕННОСТЬ

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Пирсона между численностью личинок, экз./м³ и средой. Достоверные взаимосвязи выделены жирным шрифтом

Виды Факторы	<i>Kellia</i>	<i>Serrip</i>	<i>Zirfaea</i>	<i>Mya</i>	<i>Macoma</i>	<i>Mytilus</i>	<i>Chlamys</i>	<i>Mactra</i>	<i>Hiatella</i>
Широта °	0,0405	0,1348	0,2239	0,2602	0,0620	0,2309	0,1001	0,2508	0,2035
Глубина, м	0,1119	0,1615	0,0934	0,1220	0,2145	0,1004	0,2457	0,0791	0,1966
P-PO ₄	0,1184	-0,1144	-0,2577	-0,1261	-0,0946	-0,0404	-0,1977	-0,1856	-0,1807
N-NO ₃	-0,2095	-0,3048	0,1153	-0,2147	-0,2139	-0,2098	-0,0976	-0,0210	-0,2639
N-NH ₄	-0,2651	-0,2401	-0,1266	-0,1921	-0,0906	-0,1687	-0,2030	-0,0104	-0,2374
Si	-0,2561	-0,4085	-0,1634	-0,3853	-0,0896	-0,3519	-0,3580	-0,1709	-0,3973
O ₂ у поверхности	-0,0996	-0,1938	-0,3135	-0,1958	-0,0051	-0,3129	-0,2337	-0,0563	-0,3295
Chl a	-0,2609	0,3383	-0,0021	0,4175	-0,0877	0,1347	-0,1321	0,5414	0,4680
S psu	0,0646	0,3184	0,2300	0,0749	-0,0203	0,1641	0,1103	-0,0922	0,3345
C растворённый	0,0118	-0,2389	0,2972	-0,2586	0,1358	-0,0962	0,2077	-0,2752	-0,1927
T°C у поверхности	0,1309	0,2418	0,4604	0,2206	0,1325	0,2072	0,4574	0,1047	0,3398
T°C у дна	0,0891	0,2097	0,1704	0,2049	-0,0111	0,3715	0,1484	0,0151	0,2083
O ₂ у дна	-0,1340	-0,5175	0,0224	-0,3346	-0,1324	-0,2094	-0,0346	-0,1285	-0,5917
S psu Зонда	0,0561	0,3020	0,2744	0,2755	-0,0379	0,2188	0,2758	0,1865	0,3367
pH	0,2131	0,1127	-0,0024	-0,2361	0,4316	0,0547	0,0975	-0,5343	0,0764

Таблица 4. Дисперсионный анализ (ANOVA/MANOVA) взаимосвязей численности личинок с факторами среды по уровню значимости – *p*. Жирным шрифтом выделены достоверные значения

Фактор	<i>Kellia</i>	<i>Serripes</i>	<i>Zirfaea</i>	<i>Mya</i>	<i>Macoma</i>	<i>Mytilus</i>	<i>Chlamys</i>	<i>Mactra</i>	<i>Hiatella</i>
Широта	0,896	0,998	-----	0,478	0,229	0,058	0,001	-----	0,687
Глубина	0,963	0,100	0,945	0,145	0,998	0,459	0,322	0,000	0,994
P-PO ₄	0,337	0,816	0,755	0,919	0,865	0,761	0,573	0,803	0,531
N-NO ₃	0,436	0,554	0,641	0,494	0,416	0,440	0,712	0,780	0,570
N-NH ₄	0,695	0,771	0,809	0,592	0,317	0,877	0,983	0,886	0,993
Si	0,001	0,947	0,966	0,006	0,724	0,017	0,996	0,000	0,989
O ₂ у поверхности	0,842	0,987	0,902	0,991	0,609	0,964	0,998	1,00	1,00
Chl a	0,661	0,139	0,988	0,857	0,552	0,176	0,995	0,998	0,001
S psu	0,767	0,963	0,893	0,908	0,603	0,106	0,981	1,00	0,985
C растворённый	0,941	0,654	0,952	0,448	0,427	0,080	0,950	0,000	0,048
T°C у поверхности	0,807	0,851	0,412	0,810	0,769	0,732	0,040	0,976	,188
T°C у дна	0,018	0,975	0,000	0,000	0,247	0,000	0,023	0,000	0,711
O ₂ у дна	0,000	0,271	0,000	0,000	0,416	0,048	0,048	0,000	0,210
S psu Зонда	0,823	0,332	0,641	0,437	0,881	0,346	0,324	0,608	0,185
pH	0,414	0,520	0,754	0,305	0,176	0,084	0,960	0,958	0,988

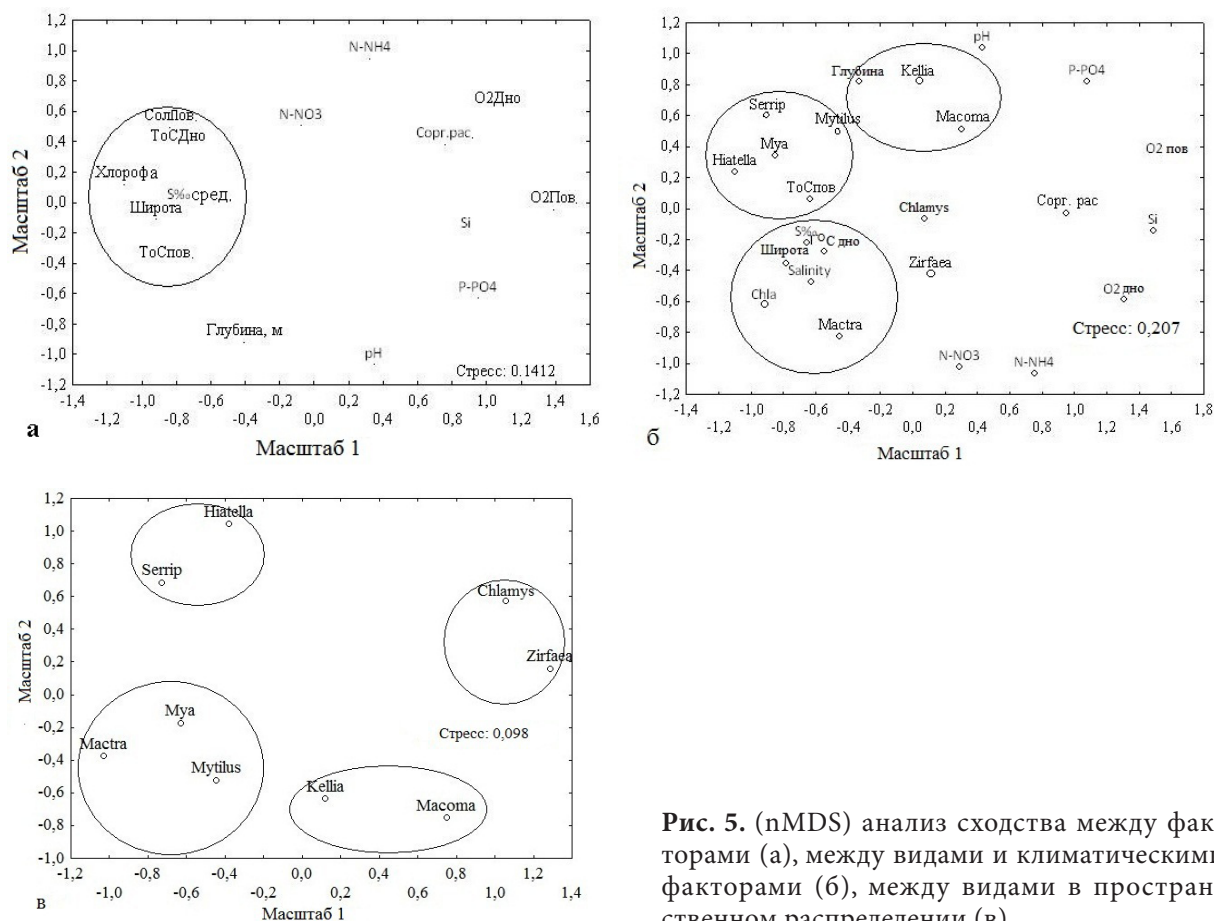


Рис. 5. (nMDS) анализ сходства между факторами (а), между видами и климатическими факторами (б), между видами в пространственном распределении (в).

подтвердили сходство с (ДА) только во взаимосвязи *Mactra* с температурой воды у дна, у остальных видов сходства с (ДА) не было обнаружено (табл. 4, рис. 5б).

Различные границы экологических оптимумов у видов приводят к тому, что исследуемые виды демонстрируют различное пространственное распределение (рис. 6).

Направленные к северу течения и реки оказывают существенное воздействие как на климат, так и на экосистему всего Северного ледовитого океана (Писарева, 2018). Это огромный источник пресных вод, тепла и биогенов для Арктики (Steele et al., 2004; Woodgate et al., 2012), стимулирующий первичную продукцию в регионе (Книпович, 1938; Danielson et al., 2017; Sigler et al., 2017). Положительное влияние Берингова моря на продуктивность и биоразнообразие Чукотского моря подтверждают многочисленные исследования (Слабинский, Фигуркин, 2014; Plourde et al., 2005).

Особенно заметно влияние Берингова моря с восточной стороны исследуемой акватории, куда поступает его летняя вода, образованная смешиванием богатой биогенами анадырской воды с берингоморской (Coachman et al., 1975; Weingartner et al., 2005). Соединение нескольких течений в районе банки Геральда приводит к их конвергенции, резко изменяющей океанологические характеристики (Голиков и др., 1991).

Положительные температуры воды от поверхности до дна, скорее всего, благотворно воздействуют на размножение микроводорослей и нерест моллюсков. В тепловодных районах наблюдалась не только максимальная численность нескольких видов (табл. 2), но и суммарное обилие всех исследованных личинок (табл. 1). Эти станции находились рядом с Беринговым проливом, где происходит столкновение тёплых вод Берингова моря с холодными водами Арктики (Книпович, 1938).

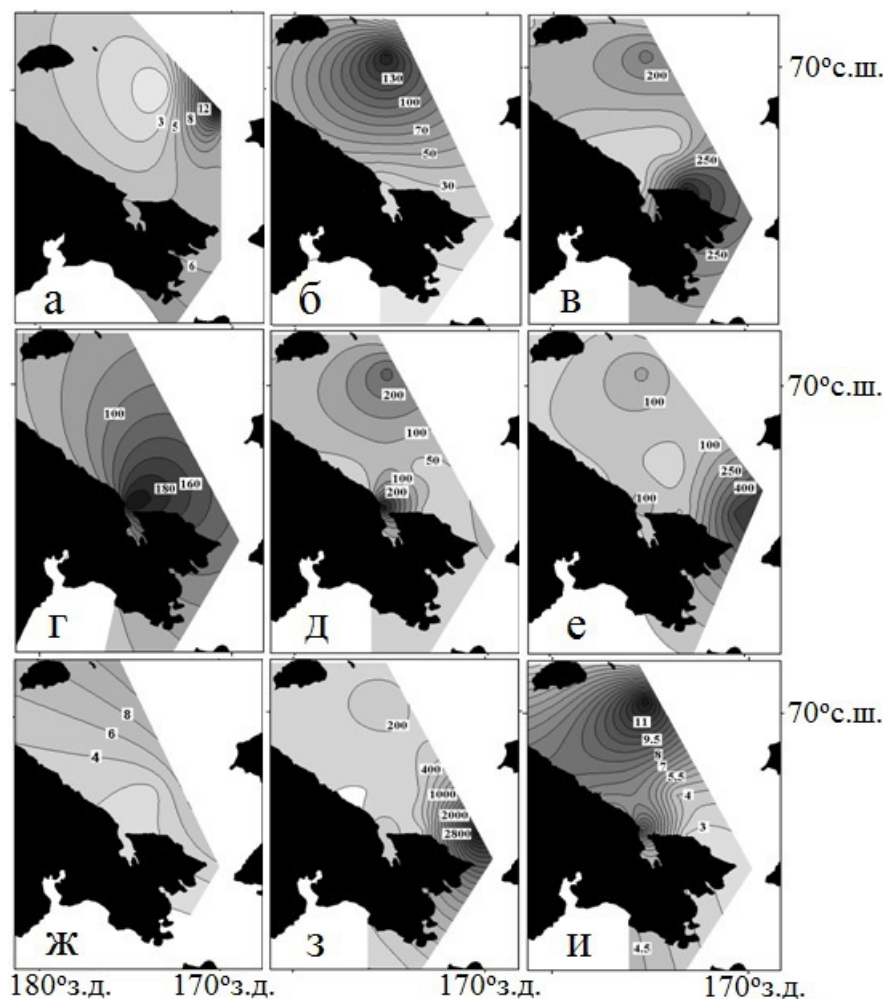


Рис. 6. Пространственное распределение личинок двустворчатых моллюсков: а – *Zirfaea* spp., б – *Kellia* spp., в – *Macoma* spp., г – *Macra* spp., д – *Mya* spp., е – *Serripes groenlandicus*, ж – *Chlamys* spp., з – *Hiatella arctica*, и – *Mytilus trossulus*.

Положительное и достоверное сходство пространственного распределения личинок трёх видов моллюсков – *H. arctica*, *Mya* spp. и *Macra* spp. можно объяснить их высокой взаимосвязью с концентрацией (*chl*) (табл. 3). На станциях с максимальной численностью личинок концентрация (*chl*), как правило, была выше, чем на «бедных» станциях (Gabaev, Kolotukhina, 2019).

Кроме (*chl*) на пространственное распределение и состав меропланктона воздействует изменчивость температуры и солёности воды (Michelsen, 2017). Глубина станций, где суммарное количество личинок превышало 3000 экз./м³ достигала 42–58 м (табл. 1). На этих станциях температура воды у поверх-

ности была выше 4,0°C, а у дна не опускалась ниже 1,5°C (станции 12, 16, 17, 18, 25) (табл. 1). В то же время на станциях с низким обилием личинок температура воды у поверхности была, как правило, ниже 4°C (станции 4, 8, 11, 14 и 21), а у дна обычно опускалась до отрицательных значений (табл. 1).

Наибольшее сходство между пространственным распределением личинок *Chlamys* spp. и *Zirfaea* spp., по-видимому, объясняется их сходной термотатией (табл. 3), для которых наиболее благоприятный температурный режим наблюдается южнее Чукотского моря (Gabaev, Kolotukhina, 2019). В этом море *Zirfaea* spp. не отмечена (Скарлато, 1981), а *Chlamys* spp. образует скопления на его мелководье

(Голиков и др., 1991). Сходство пространственного распределения между *S. groenlandicus* и *H. arctica* можно объяснить их близкой реакцией на концентрацию Si и O₂ у дна (табл. 3). Различия в воспроизводстве между видами связаны с их биогеографическими границами (Pickart et al., 2005) и максимальное обилие *H. arctica* в наших пробах, возможно, объясняется близостью производителей, обитающих на каменистых грунтах Берингова пролива (Свиточ, Талденкова, 1994).

Большая частота встречаемости личинок *Kellia* spp., *Mya* spp. и *M. trossulus* у северных островов, по-видимому, говорит о наличии там комфортных условиях для производителей, в то время как другие бореально-арктические и низко-бореальные виды (*Macoma* spp., *Macra* spp. и *H. arctica*) наибольшую численность демонстрировали на юге Чукотского моря (рис. 6). Существующая система течений местного характера, как правило, способствует удержанию личинок рядом с производителями (Милейковский, 1977), а сами личинки обладают приспособлениями и особенностями поведения, препятствующими их выносу на большие расстояния (Arnold et al., 1998).

Межвидовое различие пространственного распределения личинок заметно по соотношению видов в планктонных пробах (табл. 2). Максимум численности личинок *Macoma* spp. и *S. groenlandicus* на юге Чукотского моря и их большую частоту встречаемости у островов Врангеля и Геральда (рис. 6, табл. 2,) можно объяснить совпадением периода отлова личинок с началом пелагического периода по крайней мере у *S. groenlandicus*. Этот вид имеет циркум – арктическое распределение, объясняющее его позднюю встречаемость по сравнению с более теплолюбивыми *Mya truncata* или *Hiatella arctica* (Brandner et al., 2017).

К негативному последствию глобального потепления на обитателей моря можно отнести увеличение в воде концентрации углекислоты (Coyle et al., 1996; Pickart et al., 2005). Распределение *Kellia* spp. и *Macoma* spp.

показали зависимость от pH среды, а *Zirfaea* spp., *Mya* spp. и *Macra* spp. отрицательно коррелировали с этим параметром (табл. 3). Возможно, эта взаимосвязь зависит от толщины личиночной раковины, способной раствориться в окисленной морской воде (Ocean discharge..., 2012). Причём у некоторых родов тонкие раковины отмечаются и у взрослых моллюсков (Скарлато, 1981).

Достоверная, но слабая взаимосвязь пространственного распределения личинок исследуемых видов с абиотическими факторами (табл. 3, рис. 5б), возможно, объясняется тем, что личинки часто имеют более широкие границы экологического оптимума, чем взрослые особи (Ярославцева и др., 1988). Поэтому, несмотря на то, что температура и (*chl*) положительно воздействуют на наблюдаемую структуру сообщества, степень этого влияния низка (Hopcroft et al., 2010; Kitamura et al., 2017), а для *Macoma balthica* повышение температуры морской воды представляется неблагоприятным фактором для численности продуцируемых личинок, сдвигая при этом нерестовый период (Philippart et al., 2003). «Урожайный» период в планктоне выпадает на серию холодных лет, а «средне-продуктивный» – нормальных и тёплых лет (Волков, 2018). Однако повышение температуры морской воды сокращает время личиночного развития, что увеличит как выживаемость личинок, так и численность рекрутов (O'Connor et al., 2007) (из Stübner, 2016). Причём повышение температуры благоприятствует воспроизводству теплолюбивых видов в ущерб холодолюбивым и бентосная фауна в большей степени представляет тепловодный комплекс субарктического, тихоокеанского происхождения (Hopcroft et al., 2010).

В некоторой степени влияние тёплой Берингоморской воды заметно и на распределении (*chl*). Его максимальные значения отмечались около Берингова пролива с постепенным снижением при продвижении к островам Врангеля и Геральда (Gabaev, Kolotukhina, 2019). По-видимому, высокие кон-

центрации (*chl*) способствовали обилию личинок двустворчатых моллюсков у Берингова пролива (до 12400 экз./м³), у банки Геральда (до 4987 экз./м³) и у Колючинской губы (до 4052 экз./м³), приближенных к циклоническому круговороту, отмеченного еще в 1933 г. (Экосистемы..., 2009).

Несмотря на большое воздействие вод Берингова моря на Чукотское море, их прямое влияние на бентос ограничено из-за низких температур Чукотского моря (Кособоква, 2010; Norcroft et al., 2010; Grebmeier, Maslowski, 2014). Почти все субарктические шельфовые тихоокеанские виды, поступающие через Берингов пролив, погибают в пределах шельфа под влиянием арктических условий, не проникая в его океанические районы (Norcroft et al., 2010). Однако отдельные случаи проникновения аллохтонных видов в Чукотское море на «волне» глобального потепления всё же имеют место (Сиренко, Гагаев, 2007). Изменения климата могут расширить границы проникновения, размерный спектр и продуктивность сообществ Чукотского моря и тем самым изменить состав, распределение, запас, производство зоопланктона и хищников, что служит основанием для регулярного мониторинга (Norcroft et al., 2010; Norcroft et al., 2014).

Результаты исследований в аномально теплый 2016 г. (Kedra et al., 2015) показали достаточно высокую численность личинок двустворчатых моллюсков. Однако нет оснований считать показатели этого года рекордными. Это объясняется тем, что наблюдения за зоопланктоном в американской половине Чукотского моря в 2008–2012 гг. показали наиболее благоприятным для воспроизводства 2010 г. с промежуточными максимальными температурами, например: ~ 6°C и ~ 8°C в 2008 и 2009 гг. соответственно, и ~7.5°C в 2010 г. (Questel et al., 2013; Norcroft et al., 2014). В тёплый 2004 г. в Чукотском море личинок двустворчатых моллюсков было меньше, чем в холодные 2009 и 2010 гг. (Ershova et al., 2015).

Высокая численность личинок крупного двустворчатого моллюска *Serripes groenlandicus*, а также возможное увеличение численности личинок *M. trossulus* и *Chlamys* sp. в случае оптимизации процесса воспроизводства создадут благоприятные условия для плантационного культивирования этих ценных видов.

Полученные результаты подтверждают высокую продуктивность Чукотского моря и перспективность марикультуры двустворчатых моллюсков благодаря заметным изменениям климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты обработки проб планктона, взятые в Чукотском море и севере Берингова моря показали высокую численность личинок двустворчатых моллюсков, особенно значимых у Берингова пролива. Заметное потепление Арктики позволяет надеяться на создание технологий культивирования ценных двустворчатых моллюсков в суровых условиях Чукотского моря.

Благодарности

Авторы благодарят начальника экспедиции к.б.н. В.С. Одинцова и ст. н. с, к.х.н. Л.Н. Пропп за материалы по абиотическим факторам среды и рецензента за конструктивные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. 2-е изд. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
- Волков А.Ф. Современное состояние весеннего планктонного сообщества северной части Охотского моря (1997-2017 гг.) // Известия ТИНРО. 2018. Т. 192. С. 121–135.
- Голиков А.Н., Бабков А.И., Голиков А.А. Донное население банки Геральда в Чукотском море // Океанология. 1991. Т. 31. Вып. 4. С. 628–630.
- Денисенко С.Г., Сиренко Б.И., Петряшев В.В. Биоресурсы зообентоса в Чукотс-

ком море // Материалы Международной Научной Конференции «Морские Исследования Полярных Областей Земли в Международном Полярном году 2007–2008» 21–23 апреля 2010 г. СПб., 2010. С. 239–240.

Зонн И.С., Костяной А.Г., Куманцов М.И. Чукотское море. Энциклопедия. Москва: Международные отношения, 2013. 176 с.

Книпович Н.М. Гидрология морей и солоноватых вод (в применении к промысловому делу). М.: Л. Пищепромиздат, 1938. 513 с.

Кособокова К.Н. Зоопланктон арктического бассейна: структура сообществ и региональные особенности количественного распределения: Автореф. дис. док. биол. наук. М.: ИО РАН. 2010. 48 с.

Котенев Б.Н. (ред.). Комплексные исследования экосистемы Берингова моря. Сб. науч. тр. М.: ВНИРО. 1995. С. 1–412.

Милейковский С.А. Личинки бентосных беспозвоночных // Биология океана. Биологическая структура океана. М.: Наука, 1977. С. 96–106.

Писарева М.Н. Обзор последних исследований водных масс Чукотского моря и их циркуляции // Российский журнал наук о Земле. 2018. Т.18. № 4. С. 1–37.

Свиточ А.А., Талденкова Е.Е. Новейшая история Берингова пролива // Океанология. 1994. Т. 34. № 1. С. 439–443.

Сиренко Б. И., Гагаев С. Ю. Необычное обилие макробентоса и тихоокеанские вселенцы в Чукотском море // Биология моря. 2007. Т. 33. № 6. С. 399–407.

Скарлато О.А. Двустворчатые моллюски умеренных вод северо-западной части Тихого Океана. М.: Наука. 1981. 479 с.

Слабинский А.М., Фигуркин А.Л. Структура планктонного сообщества Южной части Чукотского моря в летний период // Известия ТИНРО. 2014. Т. 178. С. 1350–147.

Ушаков П.В. Чукотское море и его донная фауна // Фауна и флора Чукотского моря. Крайний северо-восток Союза ССР. Ленинград. АН СССР. 1952. Т. 2. С. 1–82.

Экосистемы и биоресурсы Чукотского моря. В серии: Исследования фауны морей. СПб. 2009. Вып. 64. № 72. 327 с.

Ярославцева Л.М., Найдено Т.Х., Сергеева Э.П., Ярославцев П.В. Влияние пониженной солёности на приморского гребешка в оогенезе // Биол. моря. 1988. № 5. С. 55–60.

Arnold W.S., Marelli D.C., Bray C.P., Harrison M.M. Recruitment of Bay Scallop *Agropecten irradians* in Floridan Gulf of Mexico Waters Scales of Coherence // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1998. V.170. P. 143–157.

Berge J., Johnsen F., Nilsen F. et al. Ocean Temperature Oscillations Enable Reappearance of Blue Mussels *Mytilus edulis* in Svalbard After a 1000 Year Absence // Marine Ecology Progress Series. 2005. V. 303. P. 167–175.

Brandner M.M., Stübner E., Reed A.J. et al. Seasonality of Bivalve Larvae Within a High Arctic Fjord // Polar Biol. 2017. V. 40. P. 263–276.

Clarke K.R., Gorley R.N., Somerfield P.J., Warwick R. M. Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation. Plymouth: RIMER-E, 2014. 260 p.

Coachman L.K., Aagaard K. Physical Oceanography of Arctic and Subarctic Seas // Mar. Geol. Oceanogr. Arctic Seas. 1974. P. 1–72.

Coachman L.K., Aagaard K., Tripp R.B. Bering Strait // The Regional Physical Oceanography. 1975. P. 1–172.

Coyle K.O., Chavtur V.G., Pinchuk A.I. Zooplankton of the Bering Sea: A Review of Russian-Language Literature // Ecology of the Bering Sea: A Review of the Russia Liter. 1996. P. 97–133.

Crane K., Ostrovskiy A. Russian-American Long-term Census of the Arctic // Highlights from RUSALCA. 2009. P. 1–14.

Danielson S.L., Eisner L., Ladd C. et al. A Comparison Between Late Summer 2012 and 2013 Water Masses, Macronutrients, and Phytoplankton Standing Crops in the Northern Bering and Chukchi Seas // Deep-Sea Res. II. 2017. V. 135. P. 7–26.

Ershova E.A., Hopcroft R.R., Kosobokova K.N. Inter-annual Variability of Summer

- Mezozooplankton Communities of the Western Chukchi Sea: 2004–2012 // *Polar Biology*. 2015. V. 38. P. 1461–1481.
- Gabaev D.D., Kolotukhina N.K. The Allocation of Some Pelagic Larvae of Bivalve Mollusks in the Western Part of Chukchi Sea and the Influence of Abiotic Factors on It // *Amer. J. Mar. Sci.* 2019. V. 7. 1. P. 7–26.
- Grebmeier J.M. Shifting Patterns of Life in the Pacific Arctic and Sub-Arctic Seas // *Rev. Mar. Sci.* 2012. V. 4. P. 63–78.
- Grebmeier J.M., Cooper L., Feder H.M., Sirenko B.I. Ecosystem Dynamics of the Pacific-influenced Northern Bering, Chukchi and East Siberians Seas // *Prog. in Oceanog.* 2006. V. 71. P. 331–361.
- Grebmeier M. J., Maslowski W. eds. *The Pacific Arctic Region: Ecosystem Status and Trends in a Rapidly Changing Environment*. Springer, 2014. 450 p.
- Hopcroft R.R., Kosobokova K.N., Pinchuk A.I. Zooplankton Community Patterns in the Chukchi Sea During Summer 2004 // *Deep-Sea Research II*. 2010. V. 57. P. 27–39.
- Hopcroft R.R., Hariharan P., Questel J. et al. Oceanographic Assessment of the Planktonic Communities in the Northeastern Chukchi Sea. Report for Survey Year 2012. Washington, Seattle, 2014. 86 p.
- Kedra M., Moritz C., Choy E. et al. Status and Trends in the Structure of Arctic Benthic Food Webs // *Polar Research*. 2015. V. 34. 23775.
- Kitamura M., Amakasu K., Kikuchi T., Nishino S. Seasonal Dynamics of Zooplankton in the Southern Chukchi Sea Revealed From Acoustic Backscattering Strength // *Continental Shelf Research*. 2017. V. 133. P. 47–58.
- Michelsen H.K. Seasonal and Spatial Dynamics of Meroplankton in a SubArctic Fjord. Diss. for the Degree of Philosoph. Doctor. Norway, Tromsø. 2017. 46 p.
- Ocean Discharge Criteria Evaluation for Oil and Gas Exploration Facilities on the Outer Continental Shelf in the Chukchi Sea, Alaska. U.S. Envir. Protec. Agency Reg. 10. 2012. 125 p.
- O'Connor M.I., Bruno J.F., Gaines S.D. et al. Temperature Control of Larval Dispersal and the Implications for Marine Ecology // *Evolution, and Conservation. PNAS*. 2007. V. 104. № 4. P. 1266–1271.
- Philippart C.J.M., van Aken H.M., Beukema J.J. et al. Climate-related Changes in Recruitment of the Bivalve *Macoma balthica* // *Limnological Oceanography*. 2003. V. 48. №. 6. P. 2171–2185.
- Pickart R.S., Weingartner T.J., Pratt L.J. et al. Flow of Winter-Transformed Water into the Western Arctic // *Deep Sea Research II*. 2005. V. 52. P. 3175–3198.
- Plourde S., Campbell R.G., Ashjian C.J., Stockwell D.A. Seasonal and Regional Patterns in Egg Production of *Calanus glacialis/marshallae* in the Chukchi and Beaufort Seas During Spring and Summer 2002 // *Deep-Sea Research II*. 2005. V. 52. P. 3411–3426.
- Questel J.M., Clarke C., Hopcroft R.R. Seasonal and interannual variation in the planktonic communities of the northeastern Chukchi Sea during the summer and early fall // *Continental Shelf Research*. 2013. V. 67. P. 23–41.
- Renaud P.E., Sejr M.K., Bluhm B.A. et al. The Future of Arctic Benthos: Expansion, Invasion, and Biodiversity // *Progress in Oceanology*. 2015. V. 139. № P. 244–257.
- Sigler M.F., Mueter F.J., Bluhm B.A. et al. Late summer zoogeography of the northern Bering and Chukchi seas // *Deep-Sea Research II*. 2017. V. 135. P. 168–189.
- Springer A.M., McRoy C.P., Turco K.R. The Paradox of Pelagic Food Webs in the Northern Bering Sea – II // *Continental Shelf Research*. 1989. V. 9. P. 359–386.
- Steele M., Morrison J., Ermold W. et al. Circulation of Summer Pacific Halocline Water in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2004. V. 109. № 2. P. 1–18.
- Stübner E. Seasonality of Meroplankton in Svalbard Waters. Diss. Sub. in Part. Fulfil. Requir. Degree Philosoph. Doc. in Natur. Sci. Svalbard, Norway. 2016. 57 p.

Walter G.-R., Post E., Convey P. et al. Ecological Espanses to Recent Climate Change // Nature. 2002. V. 416. P. 389–395.

Weingartner T.J., Aagaard K. Woodgate R. et al. Circulation on the North Central Chukchi Sea Shelf // Deep Sea Research II. 2005. V. 52. P. 3150–3174.

Woodgate R.A., Weingartner T.J., Lindsay R. Observed Increases in Bering Strait Oceanic Fluxes From the Pacific to the Arctic From 2001 to 2011 and Their Impacts on the Arctic Ocean Water Column // Geophys. Resea. Letters. 2012. V. 39. P. 1–6.

CONDITIONS FOR REPRODUCTION OF HYDROBIONTS

FACTORS DETERMINING THE ABUNDANCE OF PELAGIC BIVALVE LARVAE IN THE WESTERN CHUKCHI SEA

© 2025 y. D.D. Gabaev, N.K. Kolotukhina

A.V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology,
Far Eastern branch, Russian Academy of Sciences,
Russia, Vladivostok 690041

The results of processing plankton samples taken in September-October 2016 during the 48th voyage of the R/V «Akademik Oparin» in the Chukchi Sea revealed high abundance of pelagic larvae of bivalve mollusks from 22 September to 1 October. Nine species were identified to genus and species. Using Pearson's criterion, the abundance of two of them (*Serripes groenlandicus* and *Hiatella arctica*) was significantly negatively correlated with water silicon concentration ($r = -0,4085$ and $r = -0,3973$, respectively) and oxygen concentration near the bottom ($r = -0,5175$ and $r = -0,5917$, respectively). Chlorophyll-a (*chl*) concentration ($r = 0,4175$; $r = 0,5414$ and $r = 0,4680$, respectively) significantly positively influenced the abundance of *Mya* spp., *Macra* spp. and *Hiatella arctica*. The abundance of *Zirfaea* spp. and *Chlamys* spp. was significantly positively influenced by water temperature near the surface ($r = 0,4604$ and $r = 0,4574$, respectively). *Macoma* spp. abundance was significantly positively related to the pH of the medium ($r = 0,4316$), and *Macra* spp. – ($r = -0,5343$). This criterion found 2 times less correlations of larval abundance with medium than the Dispersion Analysis (DA). Results of nMDS analysis confirmed similarity with (DA) only in the relationship of *Macra* to water temperature near the bottom. The most «harvestable» water area was off the Bering Strait and at Herald Bank.

Keywords: Chukchi Sea, pelagic bivalve larvae, spatial distribution, environmental factors.