

## Спонгиофауна озера Байкал в системе мониторинга за шесть лет наблюдений

О. О. МАЙКОВА, Н. А. БУКШУК, Л. С. КРАВЦОВА, Н. А. ОНИЩУК, М. В. САКИРКО,  
И. А. НЕБЕСНЫХ, И. А. ЛИПКО, И. В. ХАНАЕВ

Лимнологический институт СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3  
E-mail: Maikova@lin.irk.ru

Статья поступила 22.06.2022

После доработки 17.08.2022

Принята к печати 26.08.2022

### АННОТАЦИЯ

В последнее десятилетие в прибрежной зоне оз. Байкал наблюдается массовая гибель эндемичных губок. В данной работе представлены наблюдения за байкальской спонгиофауной в пределах трансект, заложенных по всему Байкалу в 2015 г. На основе визуальных описаний больных особей охарактеризованы типы повреждений байкальских губок. Выявлена тенденция снижения с 2015 к 2020 г. средних показателей проективного покрытия дна здоровыми губками разной формы тела: корковой – в 3,6 раза, ветвистой – в 2 раза и глобульной – в 4 раза. Сокращение общей площади, занимаемой здоровыми и поврежденными губками разных форм, произошло более чем в 2 раза, с 238 до 110 м<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** Lubomirskiidae, типы повреждений губок, проективное покрытие, мониторинг.

### ВВЕДЕНИЕ

Губки играют огромную роль в функционировании морских и пресных водоемов. Мировая фауна губок разнообразна, тип Porifera включает более 8000 видов, из них 238 (Demospongiae, Spongillida) являются обитателями пресных вод [Manconi, Pronzato, 2015]. Фауна губок оз. Байкал представлена 15 эндемичными и 5 космополитными видами. Эндемичные губки относятся к семейству Lubomirskiidae, включающему в себя четыре рода: *Lubomirskia*, *Baikalospongia*, *Swartschewskia*, *Rezinkovia* [Ефремова, 2001; Itskovich, 2017; Manconi, Pronzato, 2019; Bukshuk, Maikova, 2020]. Lubomirskiidae обитают в открытом

Байкале во всех котловинах озера от 1–1,5 м и до самых больших глубин, но наибольшая их численность и видовое богатство сосредоточены на глубинах 3–40 м [Ефремова, 2001; Masuda, 2009]. Из представителей космополитного семейства Spongillidae в Байкале обитает пять видов, принадлежащих к четырем родам: *Trochospongilla*, *Ephydatia*, *Spongilla* и *Eunapius* [Ефремова, 2001]. Они населяют мелководную зону (0,3–5 м) в заливах и бухтах Байкала. Стоит отметить, что таксономический статус одного из представителей Spongillidae, *Trochospongilla* sp., на настоящий момент остается спорным даже на уровне семейства [Букшук, 2014].

В настоящее время прибрежная зона Байкала подвержена влиянию глобальных климатических изменений [Shimaraev, Domysheva, 2013; Stocker et al., 2013] и возрастающей антропогенной нагрузки, что неизбежно отражается на состоянии биоты [Kravtsova et al., 2014; Timoshkin et al., 2016; Kravtsova et al., 2021]. Учитывая, что основное видовое разнообразие многих бентосных организмов сосредоточено в литорали [Kozhova, Izmesteva, 1998], изменения, происходящие здесь в последние десятилетия, вызывают особую тревогу. Именно байкальское эндемичное семейство *Lubomirskiidae* стало первым в мире примером массового заболевания и гибели среди пресноводных губок [Timoshkin et al., 2016; Khanaev et al., 2018]. Хотя сведения о заболеваниях и гибели морских губок начали появляться гораздо раньше, с середины XX в. [Smith, 1941], при этом тенденция их роста в настоящее время сохраняется [Luter, Webster, 2017; Ereskovsky et al., 2019]. Байкальские губки *Lubomirskiidae*, как и морские, характеризуются разнообразными признаками проявления заболеваний. Для морских губок обычно используется именно термин “заболевание”, хотя природа наблюдаемых патологий в большинстве случаев остается неясной. Поскольку этиология заболеваний *Lubomirskiidae* также неизвестна, мы считаем более корректным использование термина не “заболевание”, а “повреждение”. Под поврежденными губками мы подразумеваем особи с различными внешними признаками патологических состояний, не характерных для здоровых губок. В настоящее время поврежденные губки встречаются по всему оз. Байкал [Khanaev et al., 2018; Maikova et al., 2021].

Цель настоящей работы – на основе шестилетних наблюдений разработать классификацию типов повреждений с учетом видовой принадлежности губок, а также оценить динамику проективного покрытия дна здоровыми и поврежденными губками. Данная работа является продолжением ранее начатого исследования [Khanaev et al., 2018].

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для наблюдения за состоянием спонгиофауны Байкала в 2015 г. было заложено 11 трансект в разных котловинах озера

(рис. 1). Каждая трансекта представляет собой капроновый шнур длиной 100–150 м, размеченный через каждые 20 м, проложенный по дну озера перпендикулярно береговой линии. Особенности геоморфологии дна в районах расположения трансект подробно описаны ранее [Khanaev et al., 2018]. В рамках данной работы наблюдения за губками проводили вдоль трансект в мае–июне с 2016 по 2020 г. Для характеристики условий среды обитания губок на трансектах отбирали пробы поверхностной и придонной воды, для гидрохимического анализа – у берега (на урезе). Удельную электропроводимость воды и pH фиксировали по приборам “Эконикс” (Россия). Определение биогенных элементов выполнено спектрофотометрическими методами на приборе ПЭ 5400 (Экрос, Россия) в фильтрованных пробах воды с использованием мембранных ацетатцеллюлозных фильтров с диаметром пор 0,45 мкм. Концентрацию биогенных элементов в пробах измеряли по методикам ГОСТ 33045-2014, ГОСТ 18309-2014, РД 52.24.383-2005 и др.

Для разработки классификации типов повреждений губок на трансектах в 2016–2020 гг. проведен сбор разных видов *Lubomirskiidae*. Для этого у каждой особи под водой отбирали небольшой фрагмент поврежденного участка тела с последующей его фиксацией в 70%-м этаноле, оставляя остальную часть особи нетронутой. Дополнительно поврежденные губки были собраны на станциях в следующих районах Байкала: бух. Ая, напротив устья р. Ледяная, м. Болсодей, м. Красный Яр, м. Немнянка, губа Аяя, м. Орловский, м. Нижнее изголовье п-ова Святой Нос (см. рис. 1).

На трансектах возле меток, кроме сборов поврежденных образцов, измеряли (в 4-кратной повторности) проективное покрытие дна губками разной формы тела (корковой, ветвистой и глобульной). Под водой водолазы визуально оценивали проективное покрытие дна губками в пределах металлической рамки площадью 1 м<sup>2</sup>, поделенной на 100 равных квадратов, записывая результат в планшет.

Вид губок определяли с использованием микроскопа Olympus CX22. При идентификации видов исследовали строение скелета губок, морфологические особенности спикул, также учитывали морфологию внешнего вида

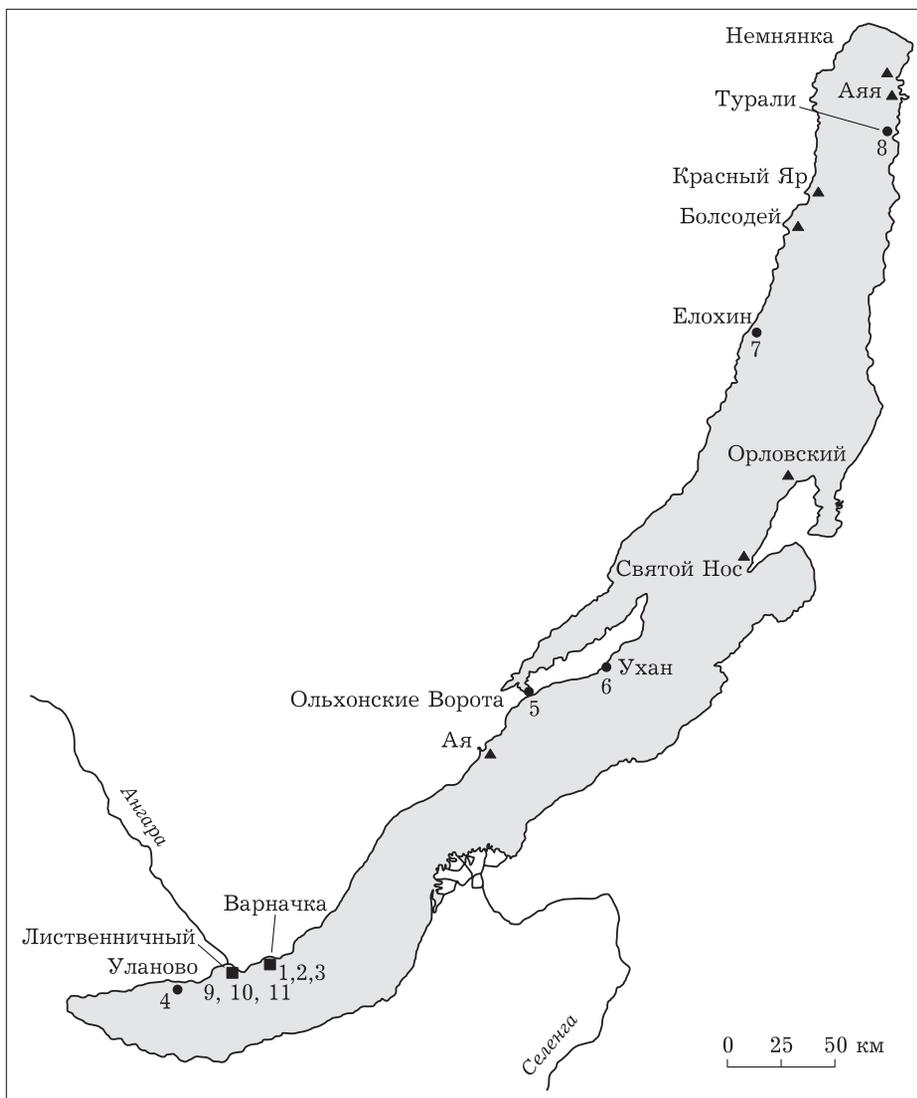


Рис. 1. Расположение трансект и станций на карте Байкала

особей: форму и консистенцию тела, цвет, строение оскулюмов.

С целью выяснения особенностей микробиома поврежденных и здоровых губок по литературным данным оценено разнообразие бактериальных групп. Кластерный анализ проведен методом UPGMA, в качестве меры расстояния использовали коэффициент сходства Жаккара.

Межгодовую динамику (2015, 2016 и 2020 гг.) проективного покрытия дна губками разных форм тела исследовали с использованием средних значений на 1 м<sup>2</sup> в процентах. Среднее значение получено с учетом данных по всем исследованным трансектам в зоне глубин от 1 до 38 м. Достоверность раз-

личий (при уровне значимости  $p = 0,05$ ) занимаемой площади (м<sup>2</sup>) дна Байкала губками разных форм в 2015 и 2020 гг. оценивали по  $t$ -критерию Стьюдента, предварительно прологарифмировав данные по функции  $\lg(X + 1)$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты гидрохимического анализа поверхностной и придонной воды представлены в табл. 1. В большинстве исследованных районов, за исключением зал. Лиственничный, содержание биогенных элементов не отличается от фоновых показателей, характерных для открытых вод Байкала. В зал. Лиственничный

Т а б л и ц а 1  
Химический состав воды вдоль трансект в мае-июне за 2015–2020 гг.

Название трансекты (№)	pH		ЕС <sub>25</sub> , мксм/см		O <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>		Si, мг/дм <sup>3</sup>		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>		NO <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>		NO <sub>3</sub> , мг/дм <sup>3</sup>		P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>		P <sub>обш</sub> , мг/дм <sup>3</sup>		COD, мгО/дм <sup>3</sup>		
	m	±σ	m	±σ	m	±σ	m	±σ	m	±σ	m	±σ	m	±σ	m	±σ	m	±σ	m	±σ	m
Листвен-ничный (9–11)	1	7,86	0,19	119,59	2,38	12,09	0,76	0,44	0,22	0,009	0,02	<b>0,002</b>	0,001	<b>0,47</b>	0,38	0,008	0,002	0,013	0,004	3,10	1,68
	2	7,77	0,14	118,47	0,93	13,26	1,35	0,41	0,20	0,007	0,03	0,001	0,001	0,42	0,08	0,008	0,002	0,014	0,008	3,29	1,63
Уланово (4)	1	8,15	0,52	119,18	1,30	12,47	0,53	0,35	0,12	0,007	0,001	0,001	0,001	0,32	0,13	0,006	0,003	0,014	0,005	3,73	1,81
	2	7,80	0,11	119,57	1,99	12,77	0,89	0,48	0,36	0,007	0,002	0,001	0,001	0,39	0,07	0,007	0,003	0,019	0,014	3,44	0,97
Варначка (1–3)	1	7,95	0,19	118,78	1,69	12,09	0,46	0,42	0,16	0,007	0,003	0,001	0,001	0,38	0,11	0,008	0,002	0,013	0,004	4,17	3,35
	2	7,89	0,19	118,16	2,36	12,77	0,71	0,41	0,16	0,006	0,001	0,001	0,001	0,41	0,06	0,008	0,002	0,018	0,010	4,25	1,78
Елохин (7)	1	8,05	0,36	118,12	1,39	13,24	1,03	0,55	0,18	0,007	0,002	0,001	0,001	0,36	0,10	0,007	0,002	0,015	0,006	3,83	1,94
	2	7,82	0,31	118,49	1,26	13,44	0,68	0,56	0,18	0,007	0,001	0,001	0,001	0,40	0,05	0,007	0,001	0,017	0,009	3,27	1,39
Туралы (8)	1	7,91	0,16	106,82	7,46	12,72	0,47	0,59	0,22	0,009	0,002	0,002	0,001	0,28	0,09	0,006	0,003	0,009	0,006	3,86	1,78
	2	7,87	0,15	111,58	7,39	13,50	1,34	0,59	0,22	0,010	0,002	0,001	0,001	0,34	0,05	0,007	0,002	0,012	0,010	3,61	1,36
Ухан (6)	1	8,14	0,43	118,39	1,74	13,19	0,66	0,24	0,15	0,008	0,002	0,001	0,001	0,28	0,10	0,006	0,002	0,016	0,012	4,43	2,24
	2	7,99	0,21	118,20	2,21	13,56	0,95	0,24	0,14	0,007	0,002	0,001	0,001	0,31	0,06	0,006	0,002	0,014	0,005	3,57	1,88
Ольхонские Ворота (5)	1	8,33	0,29	118,23	2,06	12,97	0,48	0,21	0,15	0,007	0,004	0,001	0,001	0,14	0,07	0,003	0,001	0,013	0,011	5,23	1,52
	2	8,18	0,27	117,92	2,47	13,64	0,54	0,20	0,14	0,006	0,003	0,001	0,001	0,18	0,07	0,003	0,002	0,016	0,010	5,28	1,76

Примечание. Слой воды: 1 – поверхностный, 2 – придонный; m – значение концентрации; σ – стандартное отклонение.

отмечена наибольшая концентрация нитритов и нитратов в урезовой зоне (см. табл. 1). На берегу залива расположен пос. Листвянка с большим количеством туристических баз, гостиниц и стоянок судов. В залив впадают четыре реки, протекающие через весь поселок, с водами которых в прибрежную зону поступает большое количество азота, превышающее фоновые концентрации в 10 раз [Malnik et al., 2019; Onischuk et al., 2019]. О серьезном загрязнении приустьевых участков этих рек свидетельствуют высокие концентрации аниона  $Cl^-$  – от 1 до 4 мг/л [Bukin et al., 2020].

За период 2016–2020 гг. собраны и проанализированы образцы 1062 поврежденных губок, принадлежащих к 11 видам: *L. baikalensis* (378 образцов), *B. intermedia* (241), *L. abietina* (188), *B. bacillifera* (144), *L. fusifera* (44), *L. incrustans* (24), *B. fungiformis* (21), *B. martinsoni* (11), *B. recta* (7), *R. echinata* (2), *S. papyracea* (2). Среди них отсутствовали только крайне редкие глубоководные виды (*R. arbuscula*, *S. irregularis*, *B. abyssalis*) и вид

с ограниченным ареалом (*S. khanaevi*). Списочный видовой состав поврежденных губок в наших исследованиях большей частью совпадал с видами, ранее описанными из данных районов озера [Ефремова, 2001; Masuda, 2009] (табл. 2).

На основании визуальной оценки собранных образцов губок разработана классификация типов повреждений для дальнейшего ее использования как единой системы при исследовании байкальской спонгиофауны.

**Некроз** (рис. 2, а) – тип повреждения, при котором разрушается структура тканей и скелета, губка частично или полностью приобретает светло- или темно-коричневый цвет. Некроз – наиболее тяжелый вид повреждения губок, который может привести к фрагментарной деструкции или полной гибели особи.

**Обесцвечивание** (рис. 2, б) – тип повреждения, при котором губка частично или полностью теряет зеленый цвет, становясь от светло-коричневой до белой, при этом разрушение скелета не наблюдается. Губка остается

Т а б л и ц а 2

**Сравнение видового состава поврежденных губок с литературными данными (по: [Ефремова, 2001, 2004; Вейнберг, 2005; Masuda, 2009])**

Вид губки	Котловина Байкала										
	Южная			Центральная				Северная			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>B. bacillifera</i>	+/+	+/+	+/+	-/-	-/-	+/+	+/+	-/-	-/-	-/-	+/+
<i>B. fungiformis</i>	+/+	+/+	+/+	+/-	-/-	+/+	+/+	+/-	-/-	+/+	+/+
<i>B. intermedia</i>	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+
<i>B. martinsoni</i>	-/+	+/+	+/-	-/-	-/-	-/-	*+/+	-/+	-/-	*+/+	+/+
<i>B. recta</i>	+/-	+/+	+/+	-/-	-/-	-/-	*+/+	+/+	-/-	-/-	+/+
<i>L. abietina</i>	+/+	+/+	+/+	-/+	-/-	+/+	*+/+	-/+	-/+	-/+	+/+
<i>L. baikalensis</i>	+/+	+/+	+/+	+/+	*+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	*+/+	+/+
<i>L. fusifera</i>	+/-	+/+	+/+	-/-	-/-	-/+	*+/+	-/+	-/-	-/+	+/+
<i>L. incrustans</i>	+/+	+/+	+/+	+/-	-/-	+/-	*+/+	-/-	+/-	*+/+	+/-
<i>S. papyracea</i>	+/-	+/+	+/+	-/-	-/-	-/-	-/+	-/-	-/-	-/-	+/-
<i>R. echinata</i>	+/+	+/-	+/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	+/+

**П р и м е ч а н и е.** Места сбора губок: 1 – ст. Уланово, 2 – зал. Лиственничный, 3 – Варначка, 4 – бух. Ая, 5 – пролив Ольхонские Ворота, 6 – м. Ухан, 7 – м. Елохин и р. Ледяная, 8 – м. Болсодей и м. Красный Яр, 9 – м. Немнянка и губа Ая, 10 – м. Турали, 11 – м. Орловский, м. Нижнее Изголовье (п-ов Святой Нос). Первый “+” или “-” – наличие или отсутствие вида в соответствующем месте по литературным данным, второй “+” или “-” – наличие или отсутствие вида в выборке поврежденных губок; \* – виды губок, которые отсутствовали в выборке поврежденных губок, но литературные данные об их распределении позволяют предположить их наличие в исследуемых районах.

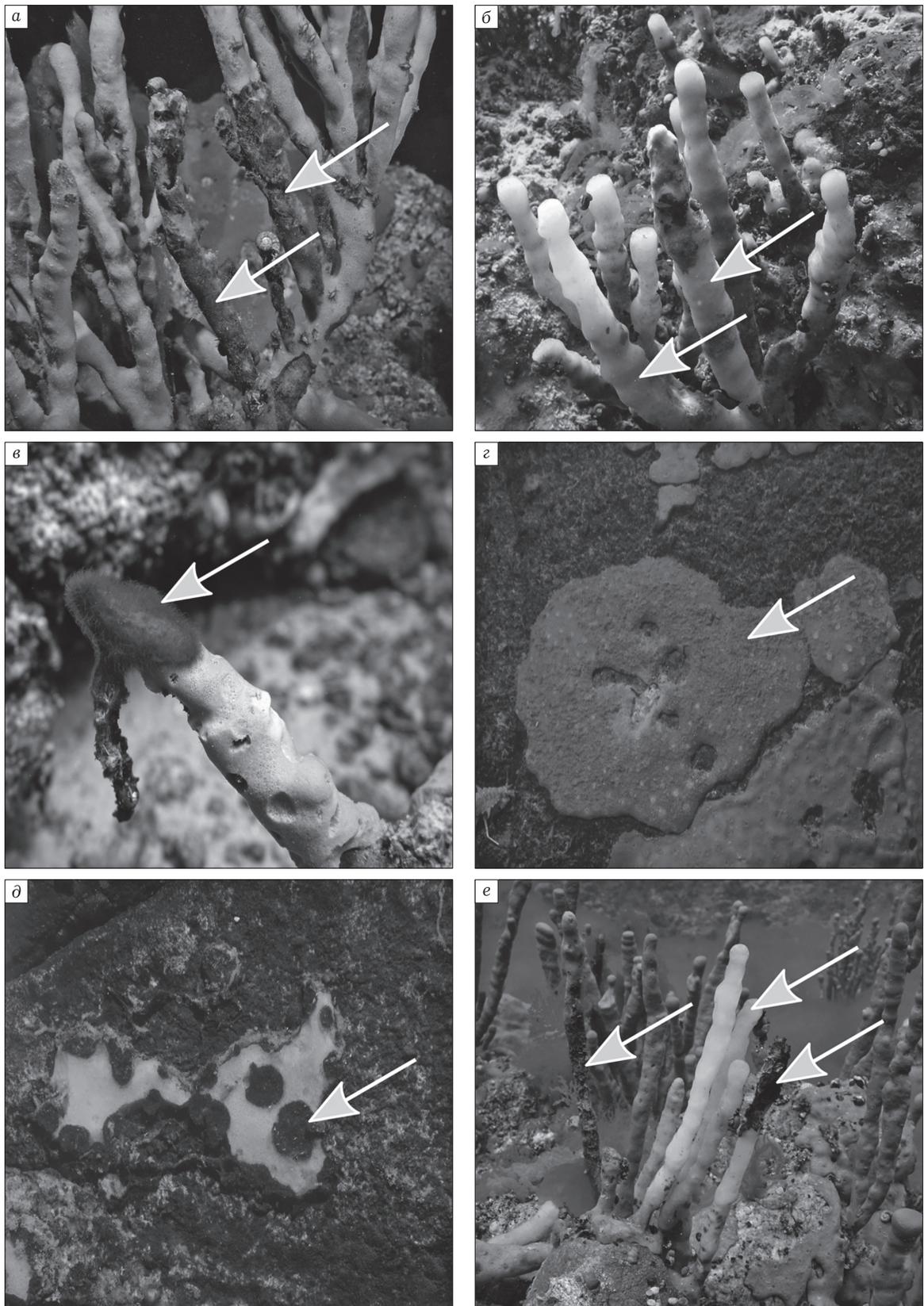


Рис. 2. Типы повреждений байкальских губок: а – некроз, б – обесцвечивание, в – биопленка, з – налет, д – пятна, е – сочетания разных типов повреждений на одной особи (некроз, обесцвечивание и биопленка)

плотной, с ровной поверхностью. Обесцвечивание может начаться с любого места на теле губки. Как правило, граница между зелеными и обесцвеченными участками тела четко выражена, нет постепенного перехода одного цвета в другой.

*Пятна* (рис. 2, д) – наиболее разнообразный по внешним признакам тип повреждений. Представляют собой плотные (значительно плотнее, чем окружающие ткани губки) объемные образования с четкими границами, проникающие в ткань губки. Окраска пятен варьируется от светло-коричневой до черной.

Помимо описанных выше типов эндогенных повреждений, на поверхности тела губок встречаются *био пленка* и *налет* (рис. 2, в, г). Мы относим эти внешние проявления к условным повреждениям экзогенного характера, так как чаще всего под этими поверхностными образованиями обнаруживается неповрежденное тело губки. Биопленка представляет собой серо-коричневые, красно-коричневые или пурпурные обрастания, чаще цианобактериальные [Sorokovikova et al., 2020], прикрепленные или не прикрепленные к поверхности тела губки. Обычно биопленка покрывает не все тело губки, а отдельные ее участки. Налет, легко смывающийся при прикосновении к губке во время сбора, представляет собой осевшие сплошным слоем на поверхности тела взвешенные частицы, преимущественно органического происхождения.

Наиболее часто среди поврежденных губок встречается некроз (40 %). На втором месте – биопленка (29 %). Примерно с одинаковой частотой отмечены повреждения у губок в виде обесцвечивания (22 %) и пятен (21 %). Налет зарегистрирован в 14 % случаев. Чаще всего (77 %) среди собранных образцов губок фиксируется какой-либо один тип повреждения. Однако найдены особи с одновременным присутствием повреждений экзогенного и эндогенного характера (рис. 2, е). Например, сочетание биопленки и некроза обнаружено у 22 % от всех особей с некрозом, биопленки и обесцвечивания – у 10 % от всех обесцвеченных особей.

Необходимо также отметить, что два редких в наших сборах вида *R. echinata* и *S. papyracea* были повреждены пятнами, причем у первого вида встречались еще и обесцвеченные особи.

Частота встречаемости типов повреждений различается в зависимости от места сбора. Налет намного чаще встречался у особей губок в зал. Лиственничный. Также здесь были распространены биопленки и пятна. В районе м. Ухан (трансекта 6), м. Турали (трансекта 8), напротив ст. Уланово (трансекта 4), м. Болсодей, м. Красный Яр, наоборот, преобладали некроз и обесцвечивание.

Проведен анализ разнообразия бактериального сообщества губок *B. intermedia*, *Baikalospongia* sp., *L. baikalensis*, *S. papyracea* и воды Байкала по опубликованным данным микробиомов [Парфенова и др., 2008, 2013; Kalyzhnaya et al., 2011; Гладких и др., 2014; Калюжная, Ицкович, 2014, 2015, 2016; Деникина и др., 2016; Краснопеев и др., 2016; Seo et al., 2016; Kulakova et al., 2018; Lipko et al., 2020, 2022]. Всего отмечено 145 таксонов из 26 бактериальных групп. Наиболее разнообразен состав микробного сообщества в воде (81 таксон) и в здоровых губках (77 таксонов), тогда как в поврежденных некрозом и обесцвеченных губках количество таксонов микроорганизмов снижается почти в 2 раза и составляет 43 и 47 соответственно. Десять из 26 бактериальных групп имеют в своем составе два таксона и более, остальные – по одному (рис. 3). Наиболее разнообразен состав таксонов Proteobacteria. Сходство таксономического состава микроорганизмов у поврежденных некрозом и обесцвеченных губок высоко, на дендрограмме они образуют одну кладу, отстоящую на значительном расстоянии от здоровых губок (рис. 3, а). Состав микробного сообщества губок в целом (по коэффициенту Жаккара) имеет сходство с водой Байкала на уровне 35 % (рис. 3, б).

Проективное покрытие дна губками, измеренное с учетом формы тела в 2016 и 2020 гг., сравнили с результатами, полученными в 2015 г. [Khanaev et al., 2018]. Корковая форма типична для видов *L. incrustans*, *B. intermedia*, *S. papyracea*, *R. echinata* и *L. abietina*. Такие губки вдоль трансект встречаются на глубинах от 1 до 38 м. Ветвистую форму среди байкальских губок имеет только один вид – *L. baikalensis*, отмеченный в пределах трансект на глубинах от 3 до 32 м. Глобульная форма тела типична для видов *B. bacillifera*, *B. fungiformis*, *B. recta* и *L. fusifera*, которые вдоль трансект обнаружены преимущественно

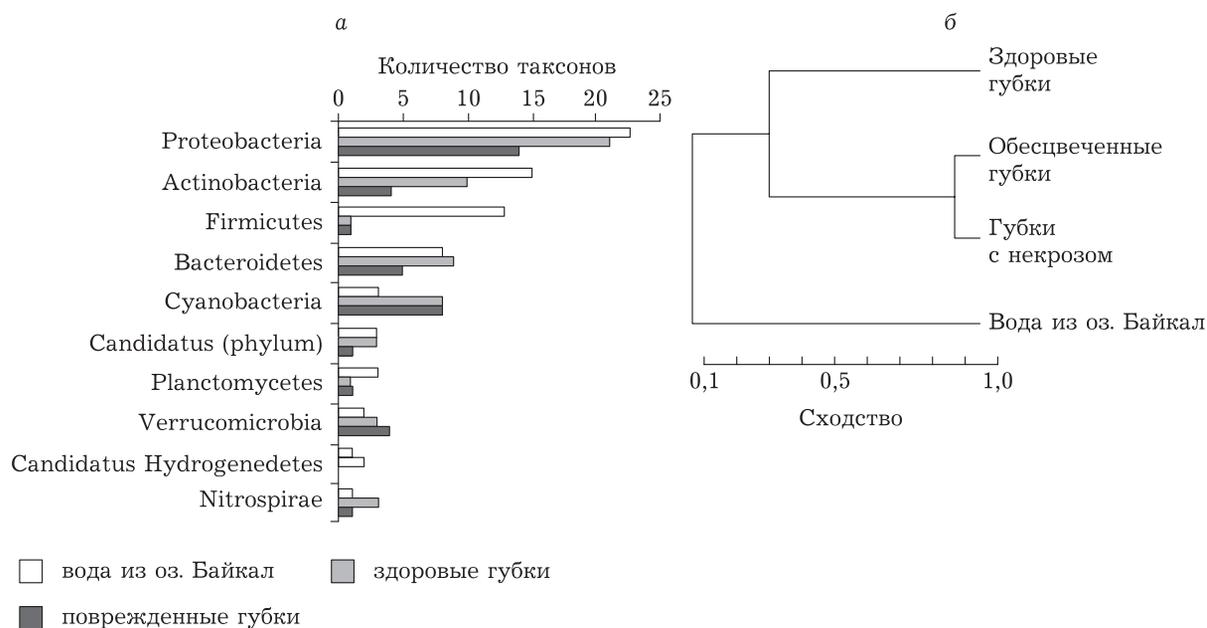


Рис. 3. Разнообразие таксонов бактериальных групп (а) и дендрограмма сходства их состава в губках и байкальской воде (б)

на больших глубинах (более 20 м), но изредка встречаются и в пределах 5–12 м.

Выявлена существенная тенденция снижения проективного покрытия дна Байкала губками всех трех форм тела с 2015 к 2020 г.

(рис. 4). Проективное покрытие здоровыми губками корковой формы в 2015 г. в среднем (для всех исследованных трансект) составляло 65 %, тогда как в 2020 г. снизилось до 18 %, при этом проективное покрытие по-

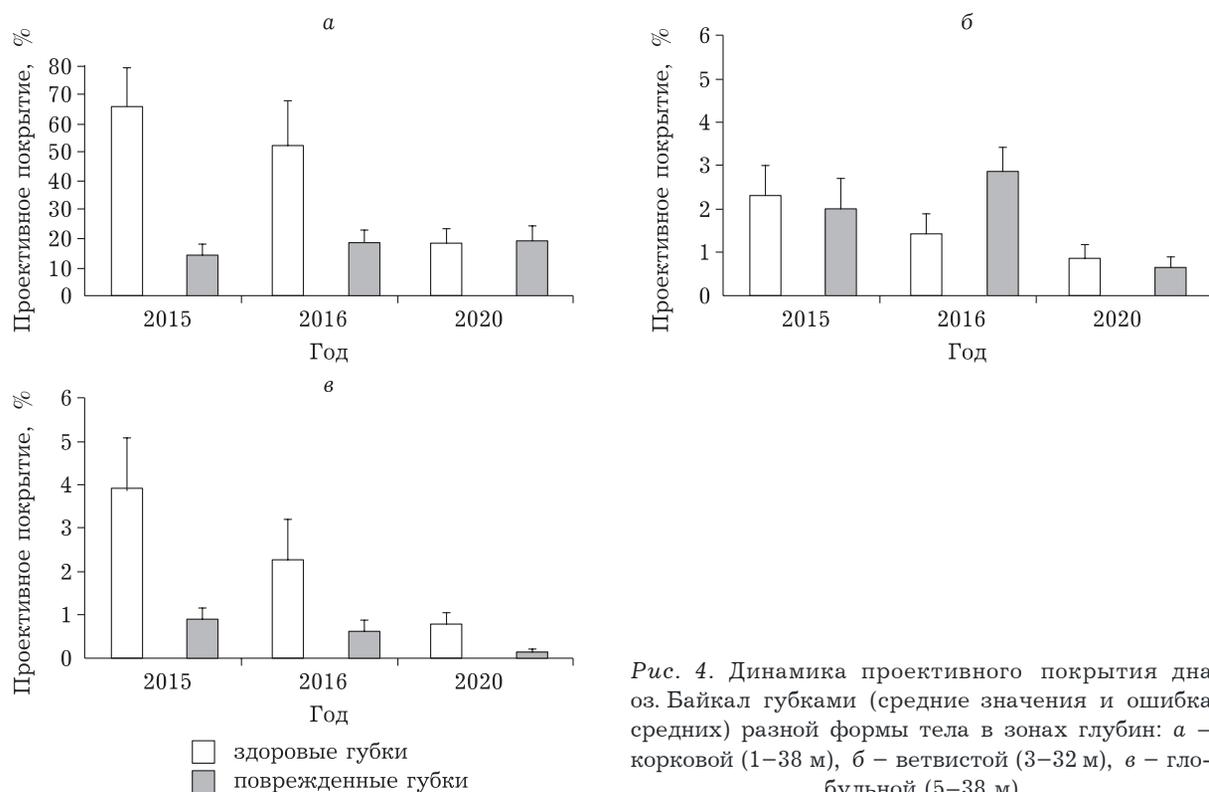


Рис. 4. Динамика проективного покрытия дна оз. Байкал губками (средние значения и ошибка средних) разной формы тела в зонах глубин: а – корковой (1–38 м), б – ветвистой (3–32 м), в – глобульной (5–38 м)

врежденными корковыми губками возросло с 14 до 19 % (рис. 4, а). Губки ветвистой формы уже в 2015 г. были существенно повреждены, показатели средних значений проективного покрытия здоровыми и поврежденными губками составляли по 2 %, а в 2020 г. снизились до 1 % (рис. 4, б). Средние значения проективного покрытия дна губками глобульной формы снизились: у здоровых с 4 % (в 2015 г.) до 1 % (в 2020 г.), у поврежденных – с 1 до <1 % соответственно (рис. 4, в).

Общая площадь, занимаемая здоровыми губками корковой формы вдоль всех трансект в 2015 г., составляла 174 м<sup>2</sup>, в 2020 г. сократилась до 48,7 м<sup>2</sup> (различия статистически достоверны,  $t_{ф} 3,2 > t_{кр} 2,1$ ), при этом площадь, занимаемая поврежденными губками корковой формы, возросла с 38,5 до 54,4 м<sup>2</sup>, но различия недостоверны ( $t_{ф} 0,4 < t_{кр} 2,1$ ). Площадь дна, покрытая здоровыми ветвистыми губками, снизилась с 6,5 м<sup>2</sup> (в 2015 г.) до 2,6 м<sup>2</sup> (в 2020 г.), а поврежденными – с 6,1 до 1,9 м<sup>2</sup>, но различия при этом статистически недостоверны ( $t_{ф} 1,7 < t_{кр} 2,1$  – для здоровых и  $t_{ф} 1,8 < t_{кр} 2,1$  – для поврежденных). Сокращение площади к 2020 г., занятой губками глобульной формы, с 10,6 до 2,3 м<sup>2</sup> (здоровыми) и с 2,1 до 0,3 м<sup>2</sup> (поврежденными) статистически достоверно ( $t_{ф} 2,3 > t_{кр} 2,1$  – для здоровых и  $t_{ф} 2,8 > t_{кр} 2,1$  – для поврежденных). Таким образом, общая площадь дна Байкала, обследованная водолазами на трансектах в 2015 г., как и в 2020 г., составила 264 м<sup>2</sup>, из них в 2015 г. 238 м<sup>2</sup> были покрыты губками. В 2020 г. площадь, занятая губками, составила 110 м<sup>2</sup>, т. е. сократилась в 2 раза.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Сохранение мировой спонгиофауны, как морской, так и пресноводной, – одна из актуальных проблем современного мира. Байкальские губки также требуют привлечения внимания к этой проблеме, что подтверждают многолетние наблюдения, проведенные в 2015–2020 гг. Распространение поврежденных эндогенного и экзогенного характера среди видов Lubomirskiidae ставит под угрозу их существование в Байкале. Особенно большую опасность для них представляют повреждения в виде некроза и обесцвечивания, приводящие часто к полной гибели особи или

деструкции части тела. Аналогичная картина наблюдается в морских экосистемах, где проблема массового заболевания губок существует с середины прошлого века [Sweet et al., 2015; Luter, Webster, 2017]. Классификация типов повреждений, предложенная нами для байкальских губок, в той или иной мере совпадает с типами заболеваний у морских видов. На примере морских губок показано, что заболевания часто сопровождаются увеличением численности цианобактерий среди симбионтов [Bourne et al., 2008; Sussman et al., 2008]. На начальных стадиях заболевания микробное разнообразие увеличивается за счет колонизации тканей губки новыми бактериями, не способными к симбиотическим отношениям, которые постепенно вытесняют естественное симбиотическое сообщество, усваивая питательные вещества [Fan et al., 2013]. При потере организмом-хозяином контроля над составом своего микробиома, в нем начинают размножаться цианобактерии, в том числе токсинопродуцирующие. В то же время, если губка не успевает ликвидировать избыток цианобактерий, это приводит к лизису ее тканей [Rützler, 1988]. По-видимому, аналогичные процессы происходят в пресноводных байкальских губках, у которых разнообразие таксонов цианобактерий выше, чем в воде (см. рис. 3, а). Причем в 2010 г. доля цианобактерий в микробиоме здоровых байкальских губок *L. baikalensis* и *Baikalospongia* sp. составляла всего 1,4 % [Гладких и др., 2014], тогда как в 2011–2012 гг. – увеличилась до 78–82 % [Деникина и др., 2016; Seo et al., 2016], а в 2014–2015 гг. – до 86 % [Sorokovikova et al., 2020]. В образцах *L. baikalensis* с некрозом количество Bacteroidetes, Proteobacteria и Cyanobacteria увеличилось в 5 раз по сравнению со здоровой губкой [Kulakova et al., 2018]. У обесцвеченных губок наблюдалось доминирование цианобактерий, увеличение доли Verrucomicrobia и снижение численности основных бактериальных групп (Bacteroidetes, Proteobacteria, Actinobacteria) и эукариотических фотосинтезирующих водорослей [Деникина и др., 2016]. При этом сходство микробного сообщества поврежденных некрозом и обесцвеченных байкальских губок довольно высоко и существенно отличается от здоровых губок (см. рис. 3, б). Очевидно, что байкальские губки, так же как и морские [Mal-

donado et al., 2015; Webster, Thomas, 2016], претерпевают серьезные изменения в видовом разнообразии симбионтов, которое напрямую зависит от микробного сообщества воды и которое в последние годы в Байкале подвержено серьезным изменениям. Как показали исследования морских губок, изменения в микробном сообществе являются не причиной заболеваний, а результатом утраты контроля над микробиомом вследствие стресса, вызванного факторами окружающей среды [Erwin et al., 2012; Pita et al., 2018].

Повреждения байкальских губок экзогенного характера (био пленка и налет) в большей мере относятся к факторам риска, а не собственно поражениям, как некроз, обесцвечивание и пятна. Это связано с тем, что био пленка и налет не затрагивают глубокие слои ткани губок и не разрушают структуру скелета. Тем не менее они способны провоцировать возникновение более серьезных повреждений. Цианобактерии *Phormidium*, *Tychoneta* (Oscillatoriales), *Limnotrix*, *Symplocastrum*, *Lep- tolyngbya*, *Tolypothrix*, *Pseudoanabaena* часто встречаются в био пленках байкальских губок [Sorokovikova et al., 2020]. Многие цианобактерии, развивающиеся на различных субстратах в Байкале, включая губок, способны продуцировать токсины: микроцистин, сакситоксин и др. [Belykh et al., 2016; Белых, 2017]. Хотя в настоящее время не доказано, что байкальские штаммы *Tychoneta* образуют токсины, исследования других водных объектов показали их способность синтезировать анатоксин, цитотоксические пептиды, ухудшающие качество воды [Shams et al., 2014]. Из цианобактерий именно *Tychoneta* sp., нетипичная для оз. Байкал, характеризуется высоким тропизмом к губкам [Sorokovikova et al., 2020].

Немаловажное влияние на жизнедеятельность байкальских губок оказывает налет, образующийся за счет оседания на поверхность тела губки взвешенных веществ в основном органического происхождения. Исследования морской спонгиофауны показали, что осадок из взвешенных частиц на поверхности тела приводит к снижению или остановке фильтрационной активности у некоторых видов [Tompkins-MacDonald, Leys, 2008; Bannister et al., 2012], а длительное воздействие может привести к гибели губок [Maldonado et al., 2008].

Показано, все исследованные типы повреждений байкальских губок не являются видоспецифичными, но при этом прослеживается их относительная связь с формой тела губки, строением скелета. Так, у ветвистого вида *L. baikalensis* почти не встречается налет, накоплению которого препятствует форма тела. Однако она не является барьером для образования био пленки, весьма распространенной на этих губках. С особенностями морфологии может быть связана и наблюдаемая у ветвистых губок высокая доля некроза. *L. baikalensis* характеризуется прочным, эластичным скелетом и упругой консистенцией тела из-за высокого содержания спонгина в скелетных пучках [Резвой, 1936]. На морских губках была показана возможность распространения бактерий, разрушающих коллаген, по спонгиновым волокнам в глубь тела губки, что приводило к более активному распространению некроза [Corriero et al., 1996; Webster et al., 2002]. Подобные процессы могут иметь место и у *L. baikalensis*.

Корковые виды *B. intermedia* и *L. incrustans* характеризуются мягкой консистенцией тела, слабо развитым скелетом и незначительным или умеренным количеством спонгина [Резвой, 1936; Ефремова, 2004], что способствует накоплению налета на их поверхности, а также формированию био пленки. Достаточно редкая встречаемость некроза и обесцвечивания у этих видов может быть связана не с устойчивостью к этим типам повреждений, а, наоборот, с быстрой деградацией губок, чему может способствовать мягкая консистенция тела. Однако утверждать это можно только после проведения количественного сбора здоровых и больных губок.

Виды *B. bacillifera*, *L. fusifera*, *B. fungiformis* и *L. abietina*, имеющие преимущественно глобульную форму тела, характеризуются очень жесткой, но хрупкой консистенцией тела, хорошо развитым скелетом с толстыми и плотно расположенными главными скелетными пучками [Резвой, 1936; Ефремова, 2004]. Эти виды были в равной степени подвержены как некрозу и обесцвечиванию, так и образованию пятен или био пленки на их поверхности. Возможно, что плотный скелет с большим количеством спикул и меньшим, чем у *L. baikalensis*, количеством спонгина не способствует распространению некроза

в глубь губки и в то же время сохраняет целостность уже пораженных губок.

Ухудшение состояния спонгиофауны Байкала в целом характеризует динамика проективного покрытия дна озера губками разных форм тела. Так, к 2020 г. (с 2015 г.), судя по осредненным данным всех исследованных трансект, произошло сокращение проективного покрытия дна здоровыми губками: корковой формы – в 3,6 раза, ветвистой – в 2 раза и глобульной – в 4 раза (см. рис. 4). Многие исследователи спонгиофауны, а также коралловых рифов приходят к заключению, что заболевания этих водных организмов вызваны стрессом на изменение условий среды обитания из-за потепления климата и антропогенного воздействия. Имеются многочисленные свидетельства того, что повышение температуры и влияние антропогенного фактора [Erwin et al., 2012; Pita et al., 2018] предшествовали вспышке заболевания морских губок, усугубляя течение болезни [Webster, 2007]. Глобальное потепление климата [Stocker et al., 2013] отражается на экосистеме Байкала, где также отмечается повышение температуры (на 1,2 °C) поверхностных вод озера [Shimaraev et al., 2013], увеличивается антропогенное воздействие на прибрежную зону Байкала [Khodzher et al., 2017]. Возможно, именно эвтрофирование прибрежной зоны Байкала на фоне изменения климата приводит к повреждениям губок на исследованных трансектах. Процессы эвтрофирования прибрежной зоны особенно очевидны в районах сильного антропогенного воздействия. Наглядным примером служит Лиственничный залив, который ранее относился к олиготрофным участкам открытого Байкала, а в последнее десятилетие по ряду показателей стал β-мезосапробной зоной [Kravtsova et al., 2021]. Здесь условия среды отличаются не только по гидрохимическим и санитарно-гигиеническим показателям [Malnik et al., 2019; Onischuk et al., 2019; Bukin et al., 2020], но и по состоянию биоты. В заливе происходит зарастание дна нитчатými водорослями [Kravtsova et al., 2014], наблюдается массовое развитие перифитонных инфузорий – маркеров эвтрофикации [Khanaev et al., 2020]. По сравнению с другими районами озера, в заливе отмечена тенденция замещения доминирующих эндемичных видов на космополитов в сообществах фитобентоса,

изменение соотношения биомассы эндемиков к мезосапробионтам в сторону увеличения последних, рост показателей сапробности автотрофов и гетеротрофов [Kravtsova et al., 2021].

Ранее для оценки влияния антропогенного фактора на распространение типов поврежденных губок и деградацию спонгиофауны были исследованы данные из двух районов: антропогенно неблагоприятного зал. Лиственничный (трансекты № 9–11) и м. Елохин (трансекта № 7), где влияние человека минимально [Maikova et al., 2021]. В результате показано, что наблюдается тенденция к снижению показателей проективного покрытия дна Байкала вне зависимости от уровня антропогенного воздействия: вдоль трансекты № 7 (мыс Елохин) – от 2 до 5,5 раза, в районе трансект № 9–11 (зал. Лиственничный) – от 2,7 до 5 раз для разных форм тела. В действительности же скорость деградации спонгиофауны в зал. Лиственничный намного быстрее, чем в других районах озера. К моменту начала мониторинговых работ в 2015 г. в зал. Лиственничный уже произошло значительное сокращение численности губок всех форм тела. Проективное покрытие здоровыми губками в 2015 г. в этом районе составляло от < 1 до 1 % [Khanaev et al., 2018]. Наблюдения за поврежденной некрозом *L. baikalensis* (высотой около 50 см) в зал. Лиственничный свидетельствуют о высокой скорости гибели – в течение четырех месяцев с начала заболевания [Сутурин и др., 2016]. Стоит отметить, что у поврежденных губок из зал. Лиственничный преобладают био пленка, налет и пятна, что напрямую связано с экологическими условиями, сложившимися в этом районе. Увеличение в сотни раз численности органотрофных бактерий свидетельствует о быстрой трансформации органики в заливе [Bukin et al., 2020], формировании в большом количестве взвешенных веществ органического происхождения, а следовательно, и налета, оседающего на поверхность тела губок. В морских водоемах также показано увеличение скорости накопления осадка на поверхности губок по мере повышения антропогенного загрязнения [Maldonado et al., 2008].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе визуального описания внешних проявлений предложена классификация типов

повреждений байкальских эндемичных губок. Показано, что все литоральные виды губок подвержены всем типам поражений. Исключения составляют виды *R. echinata* и *S. papyracea*, которые были представлены в выборке больных губок единичными образцами и имели только один тип повреждения – пятна. Из всех типов повреждений следует особое внимание уделить именно пятнам, как достаточно распространенным, но наиболее слабо изученным в настоящее время. Общая тенденция сокращения проективного покрытия дна губками всех форм тела служит серьезным поводом для принятия мер по охране байкальских эндемичных губок, направленных в первую очередь на снижение антропогенной нагрузки на экосистему Байкала.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-04-00787 в рамках бюджетных тем: 0279-2021-0005 (121032300224-8), 0279-2021-0010 (121032300196-8), 0279-2021-0014 (121032300199-9) и 0279-2021-0007 (121032300180-7).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Белых О. И., Федорова Г. А., Кузьмин А. В., Тихонова И. В., Тимошкин О. А., Сороковикова Е. Г. Обнаружение микроцистинов в цианобактериальных обрастаниях различных субстратов прибрежной зоны озера Байкал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 16, Биология. 2017. Т. 72, № 4. С. 262–269 [Belykh O. I., Fedorova G. A., Kuzmin A. V., Tikhonova I. V., Timoshkin O. A., Sorokovikova E. G. Microcystins in cyanobacterial biofilms from the littoral zone of Lake Baikal // Mosc. Univ. Biol. Sci. Bull. 2017. Vol. 72. P. 225–231].
- Букшук Н. А. Экологические особенности эндемичных губок озера Байкал: распределение и жизненные циклы: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 2014. 21 с.
- Вейнберг Е. В. Спонгиофауна плиоцен-четвертичных отложений Байкала: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2005. 22 с.
- Гладких А. С., Калужная Ок. В., Белых О. И., Ан Т. С., Парфенова В. В. Анализ бактериального сообщества двух эндемичных видов губок из озера Байкал // Микробиология. 2014. Т. 83, № 6. С. 1–12 [Gladkikh A. S., Kaluzhnaya O. V., Belykh O. I., Ahn T. S., Parfenova V. V. Analysis of bacterial communities of two Lake Baikal endemic sponge species // Microbiology. 2014. Vol. 83, P. 787–797].
- Деникина Н. Н., Дзюба Е. В., Белькова Н. Л., Ханаев И. В., Феранчук С. И., Макаров М. М., Гранин Н. Г., Беликов С. И. Первый случай заболевания губки *Lubomirskia baicalensis*: исследование микробиома // Изв. РАН. Сер. Биол. 2016. № 3. С. 315–322 [Denikina N. N., Dzyuba E. V., Bel'kova N. L., Khanaev I. V., Feranchuk S. I., Makarov M. M., Granin N. G., Belikov S. I. The first case of disease of the sponge *Lubomirskia baicalensis*: investigation of its microbiome // Biol. Bull. 2016. Vol. 43. P. 263–270].
- Ефремова С. М. Губки (Porifera) // Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна / ред. О. А. Тимошкин. Новосибирск: Наука, 2001. Т. 1, кн. 1. С. 179–192.
- Ефремова С. М. Новый род и новые виды губок сем. Lubomirskiidae Rezvoj, 1936 // Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна / ред. О. А. Тимошкин. Новосибирск: Наука, 2004. Т. 1, кн. 2. С. 1261–1278.
- Калужная О. В., Ицкович В. Б. Филогенетическое разнообразие микроорганизмов, ассоциированных с глубоководной губкой *Baikalospongia intermedia* // Генетика. 2014. Т. 50, № 7. С. 765–776 [Kaluzhnaya O. V., Itskovich V. B. Phylogenetic Diversity of Microorganisms Associated with the Deep-Water Sponge *Baikalospongia intermedia* // Rus. J. Genet. 2014. Vol. 50, N 7. P. 765–776].
- Калужная О. В., Ицкович В. Б. Влияние обесцвечивания байкальской губки на таксономический состав симбиотических микроорганизмов // Генетика. 2015. Т. 51, № 11. С. 1335–1340 [Kaluzhnaya O. V., Itskovich V. B. Bleaching of Baikalian Sponge Affects The Taxonomic Composition of Symbiotic Microorganisms // Rus. J. Genet. 2015. Vol. 51. P. 1153–1157].
- Калужная О. В., Ицкович В. Б. Особенности микробного разнообразия и спектра генов поликетидсинтаз в сообществе эндемичной байкальской губки *Swartschewskia papyracea* // Генетика. 2016. Т. 52, № 1. С. 47–58 [Kaluzhnaya O. V., Itskovich V. B. Distinctive Features of the Microbial Diversity and the Polyketide Synthase Genes Spectrum in the Community of the Endemic Baikal Sponge *Swartschewskia papyracea* // Rus. J. Genet. 2016. Vol. 52, N 1. P. 38–48].
- Краснопеев А. Ю., Букшук Н. А., Потапов С. А., Дамдинсүрэн Н., Ханаев И. В., Дрюккер В. В., Белых О. И. Генетическое разнообразие бактериальных сообществ, ассоциированных с больными губками озера Байкал // Изв. ИГУ. Серия. Биология. Экология. 2016. Т. 16. С. 3–14.
- Парфенова В. В., Гладких А. С., Белых О. И. Сравнительный анализ биоразнообразия бактериальных сообществ планктона и биопленки в озере Байкал // Микробиология. 2013. Т. 82, № 1. С. 94–105.
- Парфенова В. В., Теркина И. Л., Косторнова Т. Я., Никулина И. Г., Черных В. И., Максимова Э. Л. Микробное сообщество пресноводных губок озера Байкал // Изв. РАН. Сер. Биол. 2008. № 4. С. 435–445.
- Резвой П. Д. Пресноводные губки (сем. Spongillidae и Lubomirskiidae) // Фауна СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1936. Т. 2, вып. 2. С. 91–101.
- Сутурин А. Н., Чебыкин Е. П., Мальник В. В., Ханаев И. В., Минаев А. В., Минаев В. В. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали оз. Байкал (акватория пос. Листвянка) // География и природ. ресурсы. 2016. № 6. С. 34–53 [Suturin A. N., Chebykin E. P., Malnik V. V., Khanaev I. V., Minaev A. V., Minaev V. V. The role of anthropogenic factors in the development of ecological stress in Lake Baikal littoral (the Listvyanka settlement lakescape) // Geogr. Nat. Resour. 2016. Vol. 6. P. 34–53].
- Bannister R. J., Battershill C. N., de Nys R. Suspended sediment grain size and mineralogy across the continental shelf of the Great Barrier Reef: impacts on the

- physiology of a coral reef sponge Cont // Shelf Res. 2012. Vol. 32. P. 86–95.
- Belykh O. I., Tikhonova I. V., Kuzmin A. V., Sorokovikova E. G., Fedorova G. A., Khanaev I. V., Sherbakova T. A., Timoshkin O. A. First detection of benthic cyanobacteria in Lake Baikal producing paralytic shellfish toxins // Toxicon. 2016. N 121. P. 36–40.
- Bourne D., Iida Y., Uthicke S., Smith-Keune C. Changes in coral-associated microbial communities during a bleaching event // ISME J. 2008. Vol. 2. P. 350–363.
- Bukin Yu. S., Bondarenko N. A., Rusanov I. I., Pimenov N. V., Bukin S. V., Pogodaeva T. V., Chernitsyna S. M., Shubenkova O. V., Ivanov V. G., Zakharenko A. S., Zemskaya T. I. interconnection of bacterial and phytoplanktonic communities with hydrochemical parameters from ice and under-ice water in coastal zone of Lake Baikal // Sci. Rep. 2020. Vol. 10, N 1. P. 1–12.
- Bukshuk N. A., Maikova O. O. A new species of Baikal endemic sponges (Porifera, Demospongiae, Spongillida, Lubomirskiidae) // ZooKeys. 2020. Vol. 2020, N 906. P. 113–130.
- Corriero G., Scalera L. L., Rizzello R. Osservazioni sulla mortalità di *Ircinia spinosula* (Schmidt) ed *Ircinia* sp. (Porifera, Demospongiae) nell'insenatura della Strea di Porto Cesareo // Thalassia Salent. 1996. Vol. 22. P. 51–62.
- Ereskovsky A., Ozerov D. A., Pantyulin A. N., Tzetlin A. B. Mass mortality event of White Sea sponges as the result of high temperature in summer 2018 // Polar Biol. 2019. Vol. 42. P. 2313–2318.
- Erwin P. M., Pita L., Lopez-Legentil S., Turon X. Stability of sponge-associated bacteria over large seasonal shifts in temperature and irradiance // Appl. Environ. Microbiol. 2012. Vol. 78. P. 7358–7368.
- Fan L., Liu M., Simister R., Webster N. S., Thomas T. Marine microbial symbiosis heats up: the phylogenetic and functional response of a sponge holobiont to thermal stress // ISME J. 2013. Vol. 7. P. 991–1002.
- Itskovich V., Kaluzhnaya O., Veynberg Y., Erpenbeck D. Endemic Lake Baikal sponges from deep water. Study of the taxonomy and distribution of deep-water sponges of Lake Baikal // Zootaxa. 2017. Vol. 4236. P. 335–342.
- Kaluzhnaya O. V., Itskovich V. B., Mc. Cormack G. P. Phylogenetic diversity of bacteria associated with the endemic freshwater sponge *Lubomirskia baicalensis* // World J. Microb. Biotechnol. 2011. N 27. P. 1955–1959.
- Khanaev I. V., Kravtsova L. S., Maikova O. O., Bukshuk N. A., Sakirko M. V., Kulakova N. V., Butina T. V., Nebesnykh I. A., Belikov S. I. Current state of the sponge fauna (Porifera: Lubomirskiidae) of Lake Baikal: Sponge disease and the problem of conservation of diversity // J. Great Lakes Res. 2018. Vol. 44, N 1. P. 77–85.
- Khanaev I. V., Obolkina L. A., Belykh O. I., Nebesnykh I. A., Sukhanova E. V., Fedotov A. P. Mass development of periphyton ciliates in the coastal zone of Southern Baikal in 2019–2020 // Limnol. Freshwater Biol. 2020. N 3. P. 433–438.
- Khodzher T. V., Domysheva V. M., Sorokovikova L. M., Sakirko M. V., Tomberg I. V. Current chemical composition of Lake Baikal water // Inland Waters. 2017. Vol. 7, N 3. P. 250–258.
- Kozhova O. M., Izmet'eva L. R. Lake Baikal: evolution and biodiversity. Leiden: Backhuys Publishers, 1998. 447 p.
- Kravtsova L. S., Izhboldina L. A., Khanaev I. V., Pomazkina G. V., Rodionova E. V., Domysheva V. M., Sakirko M. V., Tomberg I. V., Kostornova T. Ya., Kravchenko O. S., Kupchinsky A. B. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal // Great Lakes Res. 2014. Vol. 40. P. 441–448.
- Kravtsova L., Vorobyeva S., Naumova E., Izhboldina L., Mincheva E., Potemkina T., Pomazkina G., Rodionova E., Onishchuk N., Sakirko M., Nebesnykh I., Khanaev I. Response of Aquatic Organisms Communities to Global Climate Changes and Anthropogenic Impact: Evidence from Listvennichny Bay of Lake Baikal // Biology. 2021. Vol. 10, N 9. P. 1–22.
- Kulakova N. V., Sakirko M. V., Adelshin R. V., Khanaev I. V., Nebesnykh I. A., Pérez T. Brown Rot Syndrome and Changes in the Bacterial Community of the Baikal Sponge *Lubomirskia baicalensis*. // Microbial. Ecol. 2018. Vol. 75, N 4. P. 1024–1034.
- Lipko I. A., Krasnopeev A. Yu., Tikhonova I. V., Timoshkin O. A., Kabilov M. R., Belykh O. I. Genetic diversity of Actinobacteria inhabiting water and sponges of Lake Baikal // Limnol. Freshwater Biol. 2020. N 4. P. 998–999.
- Lipko I. A., Krasnopeev A. Yu., Tikhonova I. V., Timoshkin O. A., Kabilov M. R., Belykh O. I. Characterization of microbial communities from the water and endemic sponges, *Lubomirskia baicalensis*, of Lake Baikal during environmental changes // AIP Conf. Proc. 2022. Vol. 2467 (in press).
- Luter H. M., Webster N. S. Sponge disease and climate change // Climate change, ocean acidification and sponges / Eds.: L. J. Carballo, J. J. Bell. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. P. 411–428.
- Maikova O., Bukshuk N., Kravtsova L., Nebesnykh I., Yakhnenko A., Butina T., Khanaev I. Baikal endemic sponge disease and anthropogenic factor // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Sci. 2021. Vol. 937, N 2. P. 1–12.
- Maldonado M., Aguilar R., Bannister R. J., Bell J. J., Conway K. W., Dayton P. K., Díaz C., Gutt J., Kelly M., Kenchington E. L. R., Leys S. P., Pomponi S. A., Rapp H. T., Rützler K., Tendal O. S., Vacelet J., Young C. M. Sponge grounds as key marine habitats: a synthetic review of types, structure, functional roles and conservation concerns // Marine animal forests: the ecology of benthic biodiversity hotspots / Eds.: S. Rossi, L. Bramanti, A. Gori. Orejas Saco del Valle C., Switzerland: Springer International Publishing, 2015. P. 1–39.
- Maldonado M., Giraud K., Carmona C. Effects of sediment on the survival of asexually produced sponge recruits // Mar. Biol. 2008. Vol. 154. P. 631–641.
- Malnik V. V., Timoshkin O. A., Sutorin A. N., Onishchuk N. A., Sakirko M. V., Tomberg I. V., Gorshkova A. S., Zabanova N. S. Anthropogenic changes in the hydrochemical and sanitary–microbiological characteristics of water quality in Southern Baikal tributaries: Listvennichnyi bay // Water Resour. 2019. Vol. 46, P. 748–758.
- Manconi R., Pronzato R. Phylum Porifera // Ecology and general biology: Thorp and Covich's freshwater invertebrates / Eds.: J. Thorp, D. C. Rogers. Amsterdam: Elsevier, 2015. P. 133–157.
- Manconi R., Pronzato R. Phylum Porifera // Keys to palaearctic fauna: Thorp and Covich's freshwater invertebrates / Eds.: D. C. Rogers, J. Thorp. Amsterdam: Elsevier, 2019. P. 45–87.
- Masuda Y. Studies on the taxonomy and distribution of freshwater sponges in Lake Baikal // Biosilica in evo-

- lution, morphogenesis, and nanobiotechnology / Eds.: W. E. G. Müller, M. A. Grachev. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. P. 81–110.
- Onischuk N. A., Netsvetava O. G., Tomberg I. V., Sakirko M. V., Domysheva V. M., Golobokova L. P., Khodzher T. V. Seasonal dynamics of mineral forms of nitrogen in the rivers, snow cover and precipitation at the southwest coast of the Southern Baikal // *Limnol. Freshwater Biol.* 2019. N 3. P. 245–252.
- Pita L., Rix L., Slaby B. M., Frank A. Hentschel UThe sponge holobiont in a changing ocean: from microbes to ecosystems // *Microbiome*. 2018. Vol. 6, N 46.
- Rützler K. Mangrovesponge disease induced by cyanobacterial symbionts: failure of a primitive immune system? // *Dis. Aquat. Org.* 1988. Vol. 5. P. 143–149.
- Seo E. Y., Jung D., Belykh O. I., Bukshuk N. A., Parfenova V. V., Joung Y., Kim I. C., Joung H., Ahn T.-S. Comparison of bacterial diversity and species composition in three endemic Baikalian sponges. Comparison of bacterial diversity and species composition in three endemic Baikalian sponges // *Annal. Limnol. – Int. J. Limnol.* 2016. Vol. 52, N 1. P. 27–32.
- Shams S., Capelli C., Cerasino L., Ballot A., Dietrich D. R., Sivonen K., Salmaso N. Anatoxin-a producing *Tycho-nema* (Cyanobacteria) in European waterbodies // *Water Research*. 2014. Vol. 69. P. 68–69.
- Shimaraev M. N., Domysheva V. M. Trends in Hydrological and Hydrochemical Processes in Lake Baikal under Conditions of Modern Climate Change // *Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies* / Eds.: C. R. Goldman, M. Kumagai, R. D. Roberts. USA, NJ, Wiley-Blackwell: Hoboken, 2013. P. 43–66.
- Smith F. G. W. Sponge disease in British Honduras, and its transmission by water currents // *Ecology*. 1941. Vol. 22. P. 415–421.
- Sorokovikova E., Belykh O., Krasnopeev A., Potapov S., Tikhonova I., Khanaev I., Kabilov M., Baturina O., Podlesnaya G., Timoshkin O. First data on cyanobacterial biodiversity in benthic biofilms during mass mortality of endemic sponges in Lake Baikal // *J. Great Lakes Research*. 2020. Vol. 46, N 1. P. 75–84.
- Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
- Sussman M., Willis B. L., Victor S., Bourne D. G. Coral pathogens identified for white syndrome (WS) epizootics in the Indo-Pacific // *PLoS One*. 2008. Vol. 3. e2393.
- Sweet M., Bulling M., Cerrano C. A novel sponge disease caused by a consortium of microorganisms // *Coral Reefs*. 2015. Vol. 34. P. 871–883.
- Timoshkin O. A., Samsonov D. P., Yamamuro M., Moore M. V., Belykh O. I., Malnik V. V., Sakirko M. V., Shirokaya A. A., Bondarenko N. A., Domysheva V. M., Fedorova G. A., Kochetkov A. I., Kuzmin A. V., Lukhnev A. G., Medvezhonkova O. V., Nepokrytykh A. V., Pasyunkova E. M., Poberezhnaya A. E., Potapskaya N. V., Rozhkova N. A., Sheveleva N. G., Tikhonova I. V., Timoshkina E. M., Tomberg I. V., Volkova E. A., Zaitseva E. P., Zvereva Yu. M., Kupchinsky A. B., Bukshuk N. A. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // *J. Great Lakes Research*. 2016. N 42. P. 487–497.
- Tompkins-MacDonald G. J., Leys S. P. Glass sponges arrest pumping in response to sediment: implications for the physiology of the hexactinellid conduction system // *Mar. Biol.* 2008. Vol. 154. P. 973–984
- Webster N. S. Sponge disease: a global threat? // *Environ. Microbiol.* 2007. Vol. 9. P. 1363–1375.
- Webster N. S., Thomas T. The sponge hologenome // *MBio*. 2016. Vol. 7. e00135–16.
- Webster N. S., Negri A. P., Webb R. I., Hill R. T. A spongin-boring  $\alpha$ -proteobacterium is the etiological agent of disease in the Great Barrier Reef sponge *Rhopaloides odorabile* // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2002. Vol. 232. P. 305–309.

## Sponge fauna of Lake Baikal in the monitoring system for six years of observations

O. O. MAIKOVA, N. A. BUKSHUK, L. S. KRAVTSOVA, N. A. ONISHCHUK,  
M. V. SAKIRKO, I. A. NEBESNYKH, I. A. LIPKO, I. V. KHANAEV

*Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences*  
664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 3  
E-mail: maikova@lin.irk.ru

In the last decade, mass death of endemic sponges has been observed in the coastal zone of Lake Baikal. This paper presents observations of the Baikal sponge fauna within the transects established throughout Baikal in 2015. Based on visual descriptions, the types of damage to Baikal sponges are characterized. A downward trend was revealed from 2015 to 2020 in the projective cover of the bottom with healthy sponges of various body shapes: encrusting – 3.6 times, branched – 2 times and globulous – 4 times. The reduction in the total area occupied by healthy and damaged sponges of various forms occurred more than 2 times, from 238 m<sup>2</sup> to 110 m<sup>2</sup>.

**Key words:** Lubomirskiidae, sponge damage types, projective cover, monitoring.