

УДК 579.68:579.26(285.2)(470)

## ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИЙ В ЛЕСНЫХ ЛАМБАХ КАРЕЛИИ

Н. А. Лаптева, Е. А. Соколова

*Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН  
Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок  
E-mail: sokol@ibiw.yaroslavl.ru*

Поступила в редакцию 02.02.2017 г., принята 03.12.2017 г.

*Лаптева Н. А., Соколова Е. А. Вертикальное распределение бактерий в лесных ламбах Карелии // Поволжский экологический журнал. 2018. № 2. С. 222 – 232. DOI: 10.18500/1684-7318-2018-2-222-232*

В малых озёрах Карелии в период стагнации изучали общую численность бактерий, количество сапрофитных, олиготрофных, сульфатредуцирующих микроорганизмов, формы бактериальных клеток, первичную и бактериальную продукцию, деструкцию органического вещества, скорость сульфатредукции. Показано, что неравномерное распределение по вертикали света, температуры, кислорода, сероводорода создавало экологические ниши для развития различных групп микроорганизмов. В большинстве озёр минимальное количество микроорганизмов определено в поверхностном слое воды, максимум и наибольшее разнообразие – в придонных горизонтах. На формирование микробных сообществ и их функционирование большое влияние оказывает тип трофии водоёма. Автотонное органическое вещество в исследованных ламбах образовывалось за счет фотосинтеза фитопланктона, но в эвтрофных озёрах в гипolimнионе бактериальная продукция превышала первичную. Содержание сероводорода, численность сульфатредуцирующих бактерий и скорость процесса сульфатредукции были максимальными в донных отложениях эвтрофных ламб.

*Ключевые слова:* озёра Карелии, численность микроорганизмов, продукция, деструкция, сульфатредукция.

DOI: 10.18500/1684-7318-2018-2-222-232

### ВВЕДЕНИЕ

Лесные ламбы Карелии – это небольшие, непроточные или слабопроточные озёра с малой глубиной, площадь водосбора и питание которых обеспечивается в основном стоком окружающих болот. Воды ламб слабокислые, цветные. Химический состав воды и степень трофии ламб определяются типом болот (Харкевич, 1960). Особенностью обследованных нами озёр являлось то, что они различались по уровню продуктивности и имели температурную и кислородную стратификацию.

Природные водоёмы – это неоднородные системы, где постоянно происходят многообразные физические, химические и биологические процессы, которые приводят к созданию разных экологических ниш для развития микроорганизмов, поэтому изучение вертикального распределения бактерий имеет большую значимость. Численность и видовое разнообразие микрофлоры, скорость микробиологи-

## ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИЙ

ческих процессов тесно связаны с экологическими условиями в водоёмах. Различные группы микроорганизмов в силу физиологических особенностей (типа обмена, специфичности используемого субстрата) развиваются в строго определенных нишах (Горленко и др., 1977). Основными факторами, влияющими на развитие бактерий, являются температурный и кислородный режим, солевой состав, степень трофии. Поэтому для исследования нами были выбраны озера с неравномерным распределением по вертикали физико-химических параметров в период стагнации (август). В это время в центре ламб наблюдалась четко выраженная температурная стратификация. Кислород у дна отсутствовал или содержался в следовых количествах. Это создавало благоприятные условия для развития в придонных слоях воды и в донных отложениях сульфатредуцирующих бактерий, которые являются главными продуцентами сероводорода в природе. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в последнее время, видовое богатство бактериопланктона описано недостаточно. Поэтому изучение форм бактериальных клеток под электронным микроскопом представляет большой интерес.

Задачей настоящей работы было изучение распределения микроорганизмов и их структурно-функционального и видового разнообразия в разных экологических зонах озёр.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Обследованы шесть озёр в Южной части Карелии в бассейне р. Шуя. Пробы воды отбирали батометром Рутнера, иловые отложения – трубчатым стратометром. Анализировали верхний 2-сантиметровый слой ила. Количество растворенного в воде кислорода определяли по методу Винклера, цветность – по хромово-кобальтовой шкале. Значения Eh и pH измеряли сразу после извлечения грунтов электрометрически при помощи переносного иономера И-102 (Завод измерительных приборов, г. Гомель, Беларусь). Влажность грунтов определяли термостатно-весовым методом. Находили потери массы ила при прокаливании (Аринушкина, 1961), которые дают общее представление о содержании органического вещества в донных отложениях. Количество сероводорода и сульфидов в воде и илах находили по модифицированной нами методике (Романенко и др., 1990), содержание сульфатов в водной вытяжке из иловых отложений – весовым методом (Аринушкина, 1961). Учет численности сапрофитных бактерий проводили на стандартном РПА (рыбопептонном агаре), олиготрофных бактерий – методом предельных разведений на стерильной воде с добавлением 10 мг/л казеината, сульфатредуцирующих – на агаризованной среде Постгейта В с лактатом (Романенко, Кузнецов, 1974). Учет общей численности бактерий производили на мембранных фильтрах «Synpro» (с диаметром пор 0.2 мкм) («Synpro», Чехия) методом эпифлуоресцентной микроскопии при окрашивании акридиноранжем. Для изучения форм бактериальных клеток под электронным микроскопом пробы воды сгущали на мембранных фильтрах с диаметром пор 0.2 мкм и наносили на сеточки с формваровой подложкой на 5 часов, капли убирали, сеточки споласкивали горячей водой, затем в течение 5 минут фиксировали в парах формалина, снова споласкивали и высушивали (Лаптева, 1976). Препараты просматривали под электронным микроско-

пом Джейм-100 («Jeol», Япония), бактерии идентифицировали по определителю бактерий Берджи (1997). Из функциональных показателей измеряли первичную и бактериальную продукцию в воде радиоуглеродным методом (с  $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ ), деструкцию органического вещества – по потреблению кислорода в изолированном объеме воды. Скорость процесса сульфатредукции в воде и илах определяли радиоизотопным методом с  $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$  по включению  $^{35}\text{S}$ -сульфата в кислоторастворимые формы сульфидов и последующей их отгонкой после подкисления в 0.1 N раствор перманганата. Меченые сульфиды переводили в сульфаты, радиоактивность которых находили под счетчиком Гейгера БФЛ-25 (СОЭКС, Россия) на фильтрах в виде осадков  $\text{Ba}^{35}\text{SO}_4$  (Романенко, Кузнецов, 1974; Кузнецов, Дубинина, 1989). Слянки экспонировали непосредственно в исследуемом озере в течение суток. Для установления корреляционных зависимостей между параметрами использовали непараметрический коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Озёра входят в зону низкоминерализованных вод подзолисто-болотистых почв и различаются по физико-химическим параметрам и гумификации (табл. 1). Самая высокая цветность отмечена в Крюкламбе, а наиболее низкие значения – в Вороновской ламбе-1 и 2. В большинстве озер цветность повышалась в придонных слоях воды. По типу перемешивания водных масс исследованные озера относились к димиктическим. В придонных горизонтах температура была низкой – от 4.4 до 12.0°C, в то время как у поверхности она варьировала от 15.5 до 21.0°C. Изменение температуры по глубине обуславливает создание аэробного эпилимниона, слоя температурного скачка и анаэробной зоны гиполимниона. Кислород во всех озерах, за исключением Вороновской лампы-2, исчезал на верхней границе гиполимниона. Неравномерное распределение по вертикали температуры, кислорода, закисных форм железа создавало четко разграниченные экологические ниши для развития различных групп бактерий, что ранее наблюдала Г. А. Дубинина (1976).

В большинстве озёр минимальное количество микроорганизмов определено в поверхностном слое воды, существенное увеличение бактерий наблюдали в слое термоклина и максимум – в придонных горизонтах, где температура воды была минимальной. Таким образом, мы наблюдали обратную связь между численностью бактерий и температурой воды. Температура – важнейший экологический фактор, но ее влияние на бактериопланктон является одной из слагающих нескольких процессов, среди которых наиболее значимым является обогащение водоёма органическим веществом. В летний период в водоёмах общая численность бактерий чаще всего превалирует в зоне массового развития водорослей (Горленко и др., 1977). Однако имеются многочисленные результаты, свидетельствующие об обратном. По данным Флиерманса с соавторами (Fliermans et al., 1976), основная масса бактерий в мезотрофном оз. Лонг была на верхней границе металимниона, а в эвтрофном оз. Арко – в гиполимнионе. При резком снижении температуры в зоне температурного скачка возрастает плотность воды. В результате этого остатки детрита и отмершего фитопланктона задерживаются здесь и способствуют массовому размножению бактерий. Увеличение численности бактериопланктона может

## ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИЙ

происходить за счет прижизненного и посмертного выделения водорослями органических веществ (Горленко и др., 1977). До 25% углерода, образованного фитопланктоном в процессе фотосинтеза, выделяется в воду в виде растворимых органических соединений, которые активно используются микроорганизмами (Jensen, 1983; Obernosterer, Herndle, 1995). По данным В. М. Горленко с соавторами (1977), общая численность бактерий повышается в придонных горизонтах в димиктических и в некоторых меромиктических озерах. В августе характерной особенностью вертикального распределения бактериопланктона в Рыбинском водохранилище было увеличение их количества в придонных горизонтах (Копылов, Косолапов, 2008), что авторы связывают с осаждением бактерий с водорослями и детритом из поверхностных слоев. По наблюдениям С. И. Кузнецова (1970), максимальное количество бактерий в воде Рыбинского водохранилища и оз. Белое отмечали не летом, а в ноябре при температуре 9°C, когда шло отмирание фитопланктона.

**Таблица 1**

Вертикальное распределение бактерий и физико-химических факторов в ламбах Карелии

Озеро	Глубина, м	Температура, °С	Содержание O <sub>2</sub> , мг/л	Цветность, град.	ОЧБ, млн кл./мл
Крюкламба	0.2	20.0	6.5	140	3.6
	2.0	14.5	1.1	150	3.5
	3.0	10.0	1.3	–	–
	8.0	4.4	0	260	1.8
Вороновская ламба-1	0.2	21.0	–	5	2.1
	3.0	20.0	6.9	10	4.0
	5.0	16.0	6.9	10	1.1
	7.0	10.0	0.3	20	7.3
	13.0	5.0	0	35	3.1
Вороновская ламба-2	0.2	19.5	6.5	20	4.6
	2.0	18.5	4.0	20	2.1
	3.5	16.5	3.0	20	1.8
	4.5	12.0	1.5	20	5.6
Корбламба	0.2	16.5	8.1	20	0.6
	3.0	16.0	8.0	20	1.7
	4.0	10.0	0.2	200	4.3
	4.5	8.0	0	250	5.3
Куалика	0.2	15.5	7.5	30	0.1
	3.5	13.5	1.8	30	1.4
	4.0	9.5	1.4	30	2.6
	5.0	7.0	0	30	3.6

*Примечание.* ОЧБ – общая численность бактерий; прочерк – отсутствие данных.

Автохтонное органическое вещество (ОВ) в исследованных ламбах образовывалось за счет фотосинтеза фитопланктона, а в эвтрофных озёрах в гипolimнионе – еще и за счет фотосинтезирующих серобактерий. Наиболее интенсивно фотосинтез водорослей протекал в поверхностном слое эвтрофных неглубоких ламб Карасево и Куалика (до 290 мкгС/(л·сут)) (табл. 2). С глубиной он снижался и у дна составлял всего 54 мкгС/(л·сут) и 2 мкгС/(л·сут) соответственно. В олиготрофной Вороновской ламбе-1 с прозрачностью воды 7 м максимум фотосинтеза был определен в 3-метровом слое воды. Деструкционные процессы протекали бо-

лее интенсивно по сравнению с продукционными. Значительные величины зарегистрированы в эвтрофных озёрах Карасево и Корбламба на глубинах 0.2 и 3.0 м соответственно (см. табл. 2). В эвтрофной Вороновской ламбе-2 максимальная деструкция была отмечена в придонных горизонтах при содержании кислорода 1.5 мг/л. С меньшей скоростью распад ОВ происходил в олиготрофной ламбе. Установлена достоверная корреляционная зависимость между общей численностью бактерий и фотосинтезом водорослей ( $r = 0.5, p < 0.05$ ), между продукцией и деструкцией ОВ ( $r = 0.5, p < 0.05$ ). Биосинтетическая активность бактерий невысока в олиготрофной и дистрофной ламбах. Темновая фиксация углекислоты, так же как и общая численность бактерий, в эвтрофных ламбах повышалась в слое термоклина и в придонных горизонтах, где температура была ниже, чем в эпилимнионе. По мнению ряда авторов, бактериальная активность в летний период обычно регулируется запасами субстратов, биогенных элементов и консументами, а в холодный период – температурой (Hoch, Kirchman, 1993; Shiah, Ducklow, 1994). Кроме того, температура в меньшей степени влияет на рост бактериопланктона в эвтрофных экосистемах по сравнению с олиготрофными (Копылов, Косолапов, 2008). В эвтрофных ламбах Корбламба и Карасево бактериальная продукция превышала первичную продукцию в придонных слоях воды. Детальный анализ фотосинтезирующих бактерий другими авторами (Горленко и др., 1977) показал, что даже в пределах одной экологической ниши развитие определенных их групп зависит от того, какие они имели фотосинтезирующие пигменты.

Численность и распределение гетеротрофных микроорганизмов также тесно связаны с типом трофии озёр и их физико-химическими характеристиками. Так, в менее продуктивных водоёмах численность сапрофитных (0.2 – 0.8 тыс. кл./мл) и олиготрофных (0.1 – 10.0 тыс. кл./мл) бактерий была невысокой с максимумом в зоне эпилимниона. В эвтрофных ламбах количество сапрофитных микроорганизмов варьировало от 5 до 13 тыс. кл./мл, а олиготрофные бактерии составили от 10 до 100 тыс. кл./мл. Их наибольшие величины постоянно учитывали в придонных горизонтах воды. В полигуменной Крюкламбе численность сапрофитных бактерий снижалась от 1.0 тыс. кл./мл в эпилимнионе до 0.4 тыс. кл./мл в придонной воде. Олиготрофные бактерии составили 1.0 тыс. кл./мл на поверхности и повышались в зоне термоклина до 10.0 тыс. кл./мл.

В придонных слоях воды и донных отложениях озёр мы изучали процесс бактериальной редукции сульфатов, играющий важную роль в анаэробной деструкции ОВ. Сульфатвосстанавливающие бактерии представляют собой важное звено, связывающее потоки углерода и серы в анаэробных зонах водоёмов. Энергия окисляемого сульфатредукторами ОВ переходит в энергию образующегося сероводорода, которая вновь расходуется на построение ОВ за счет деятельности аэробных и анаэробных фотосинтезирующих, тионовых и других бактерий (Сорокин, 1968). Часть сероводорода вовлекается в диагенетические процессы с образованием моносulfида железа, пирита, органических соединений серы и надолго выводится из круговорота. Какая-то доля его диффундирует в водную толщу, окисляется в химическом процессе абиогенно, вызывая ухудшение кислородного режима водоёма и гибель гидробионтов.

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИЙ

Таблица 2

Продукционно-деструкционные процессы в лесных ламбах Карелии

Озеро	Тип трофии	Глубина, м	ФВ	БФ	Д	ТА
			мкгС/(л · сут)			
Крюкламба	Дистрофное	0.2	59.0	0	160	2.7
		2.0	4.4	0	180	1.2
		3.0	1.7	0	0	2.0
		8.0	0	0	0	5.0
Вороновская-1	Олиготрофное	0.2	65.1	0	90	1.2
		3.0	70.0	0	60	0.7
		5.0	15.5	0	40	0.4
		7.0	0	0	–	0.4
Вороновская-2	Эвтрофное	0.2	67.0	0	180	3.0
		2.0	38.0	0	100	1.1
		3.5	7.2	0	100	3.5
		4.5	7.4	0	270	5.4
Корбламба	Эвтрофное	0.2	58.6	0	430	2.8
		3.0	31.0	44	550	–
		4.0	95.0	128	120	7.0
		4.5	0	33	0	5.0
Куалика	Эвтрофное	0.2	213.0	0	130	2.3
		3.5	11.0	0	130	–
		4.0	2.0	2	300	10.0
		5.0	2.0	0	0	11.0
Карасево	Эвтрофное	0.2	287.0	0	870	7.4
		3.0	29.5	34	570	28.5
		3.5	54.0	71	0	71.0

*Примечание.* ФВ – фотосинтез водорослей, БФ – бактериальный фотосинтез, Д – деструкция, ТА – темновая ассимиляция.

Основными факторами, влияющими на численность и активность сульфатредуцирующих бактерий, являются: содержание ОВ, температура, концентрация сульфатов и окислительно-восстановительные условия (Кузнецов и др., 1985; Gibson, 1990). Наиболее низкие величины окислительно-восстановительного потенциала (Еh и гН<sub>2</sub>) отмечены в эвтрофных озерах, более высокие – в илах олиготрофной ламбы (Вороновская-1). В придонном слое воды большинства озер кислород отсутствовал или его концентрация не превышала 1.5 мг/л (табл. 3).

Таблица 3

Физико-химическая характеристика донных отложений озёр

Озёра	pH	Еh, мВ	гН <sub>2</sub>	Влажность, %	Содержание О <sub>2</sub> у дна, мг/л	Потери при прокаливании, %
Крюкламба	5.0	+50	11.7	96.7	0	68.9
Вороновская ламба-1	5.8	+150	16.8	97.1	0.4	91.2
Вороновская ламба-2	5.9	–	–	97.9	1.5	91.3
Корбламба	6.6	+15	13.7	96.0	0	50.2
Куалика	6.4	-40	11.4	95.6	0	61.5
Карасево	5.8	+10	11.9	87.8	0	91.3

В илах озёр содержалось от 8.8 до 14.3 мгS/кг сырого ила сульфатов, и только в Корбламбе их было 42.8 мгS/кг (табл. 4). В олиготрофном озере в воде сероводород не был обнаружен, в эвтрофных ламбах он содержался в количестве до 15.0 мгS/л. Концентрация сульфидов в донных отложениях олиготрофной Вороновской ламбы составляла 27 мгS/кг, в эвтрофных озерах достигала значительных величин – до 175 мгS/кг ила. Небольшое содержание сероводорода в воде большинства озёр может быть связано с активным развитием фототрофных бактерий, которые его окисляют. Кроме того, по данным Г. А. Дубининой (1976), в малых ламбах Карелии содержались закисные формы железа в количестве до 4 мг/л. В таких озерах сероводород связывается солями закисного железа в нерастворимые сульфиды железа и осаждается (Горленко и др., 1977).

Таблица 4

Процесс бактериальной редукции сульфатов в лесных ламбах Карелии

Озеро	Содержание сульфатов, мгS/кг	Содержание сероводорода		Численность СРБ		Скорость сульфатредукции, мгS/(кг · сут)
		вода, мгS/л	ил, мгS/кг	вода, тыс. кл./мл	ил, тыс. кл./г	
Крюкламба	13.7	7.4	19.0	0.07	12.5	0.020
Вороновская ламба-1	8.8	0	27.2	–	50.0	0.140
Вороновская ламба-2	14.3	0.7	5.4	0.5	12.5	0.241
Корбламба	12.6	14.9	175.4	0.1	50.0	0.054
Куалика	42.8	3.3	99.3	4.0	650.0	0.072
Карасево	9.3	4.5	17.7	3.0	150.0	0.505

Примечание. СРБ – сульфатредуцирующих бактерий.

Численность сульфатредуцирующих бактерий в придонных слоях воды и донных отложениях и скорость процесса сульфатредукции были максимальными в эвтрофных ламбах Куалика и Карасево.

Характеризуя микрофлору на основании изучения морфологических признаков под электронным и световым микроскопами, мы обнаружили некоторые особенности распределения микроорганизмов в отдельных экологических зонах. В эпилимнионе олиготрофной ламбы основная часть бактерий представлена кокками с размерами 0.1 – 0.3 мкм и мелкими палочками с размерами 0.2 – 0.5 мкм. В эвтрофных озерах при значительном фотосинтезе у поверхности бактериальное сообщество более разнообразно, нежели в олиготрофных ламбах. Наряду с банальными формами обнаружены спириллы с биполярными выростами, микоплазмоподобные нити. Наблюдалось массовое развитие почкующихся бактерий р. *Planctomyces*, которые составляли 4% от общей численности бактерий, что отмечала и Г. А. Дубинина (1976). *Caulobacter* отмечали в зоне термоклина ряда озер, где температура была в пределах 10 – 14°C и содержание кислорода до 1 мг/л. В зоне термоклина и гиполимниона эвтрофных ламб встречались специфичные бактерии. Так, в Корбламбе находили пластинки палочковидных клеток до 16 мкм, скользящие нитчатые бактерии, зелёные серные бактерии *Chloroplana*, *Pelochromatium*, клетки с газовыми вакуолями. В придонном слое обитали спиروهеты, крупные палочковидные формы. В эвтрофных ламбах Карасево и Куалика встречались бактерии,

## ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИЙ

имеющие выросты, нитчатые и простекатные формы, фототрофные бактерии, *Pelodictyon*, *Ancalochloris*, *Chlorochromatium*. В полигуозной Крюкламбе в эпилимнионе и металимнионе находили в основном банальные формы, а в придонных горизонтах – споровые и скользящие бактерии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выбранные нами сроки исследований (август) дали возможность наблюдать градации температуры, кислорода, сероводорода в димиктических озерах и изучить структурно-функциональные особенности распределения микроорганизмов в разных экологических зонах. На формирование микробных сообществ и их функционирование оказывают влияние тип трофии водоёма и физико-химические факторы: свет, температура, содержание кислорода и сероводорода, соединения железа. В большинстве озёр минимальное количество микроорганизмов определено в поверхностном слое воды, существенное увеличение бактерий наблюдали в слое термоклина и максимум – в придонных горизонтах. Развитие бактерий зависело от содержания органического вещества, которое в основном продуцировали водоросли. Наиболее интенсивно фотосинтез протекал в поверхностном слое неглубоких эвтрофных ламб. В эвтрофных озёрах в гипolimнионе при наличии света, сероводорода и при дефиците кислорода или его отсутствии фотосинтез осуществляли фототрофные серобактерии. Деструкционные процессы в десятки раз превышали продукционные. Содержание сульфидов, численность сульфатредуцирующих бактерий и скорость процесса сульфатредукции в придонных слоях воды и донных отложениях были максимальными в эвтрофных ламбах. В эпилимнионе и металимнионе встречались в основном банальные формы микроорганизмов, а в гипolimнионе эвтрофных ламб наблюдали специфичные бактерии: споровые и скользящие нитчатые бактерии, зелёные серные бактерии *Chloroplana*, *Pelochromatium*, клетки с газовыми вакуолями, простекатные формы, фототрофные бактерии и др.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аринушкина Е. В.* Руководство по химическому анализу почв. М. : Изд-во МГУ, 1961. 491 с.
- Горленко В. М., Дубинина Г. А., Кузнецов С. И.* Экология водных микроорганизмов. М. : Наука, 1977. 289 с.
- Дубинина Г. А.* Изучение экологии железобактерий пресных водоемов // Изв. АН СССР. Сер. Биол. 1976. № 4. С. 575 – 592.
- Копылов А. И., Косолапов Д. Б.* Бактериопланктон водохранилищ Верхней и Средней Волги. М. : Изд-во Современного гуманитарного ун-та, 2008. 377 с.
- Кузнецов С. И.* Микрофлора озёр и ее геохимическая деятельность. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1970. 440 с.
- Кузнецов С. И., Дубинина Г. А.* Методы изучения водных микроорганизмов. М. : Наука, 1989. 288 с.
- Кузнецов С. И., Саралов А. И., Назина Т. Н.* Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах. М. : Наука, 1985. 213 с.
- Лантева Н. А.* Электронно-микроскопическое изучение микрофлоры Рыбинского водохранилища // Микробиология. 1976. Т. 45. С. 547 – 550.



Определитель бактерий Берджи : в 2 т. / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уилльямса. М. : Мир, 1997. Т. 2. 368 с.

*Романенко В. И., Кузнецов С. И.* Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1974. 194 с.

*Романенко В. И., Рыбакова И. В., Соколова Е. А., Лайош Вереш.* Вариант диффузного метода определения свободной углекислоты, карбонатов и сульфидов в воде и донных отложениях в закрытом сосуде // Гидробиол. журн. 1990. Т. 26, № 5. С. 64 – 69.

*Сорокин Ю. И.* Первичная продукция и микробиологические процессы в оз. Гек-Гель // Микробиология. 1968. Т. 37, № 2. С. 345 – 354.

*Харкевич Н. С.* Материалы по малым лесным озерам (ламбам Карелии) // Тр. Карельск. фил. АН СССР. 1960. Вып. 27. С. 70 – 133.

*Fliermans J. G., Schneider C. P., Schmidt E. L.* Direct measurement of bacterial stratification in Minnesota lakes // Archiv of Hydrobiology. 1975. Vol. 76. P. 248 – 255.

*Gibson G. R.* Physiology and ecology of the sulfate-reducing bacteria // J. of Applied Bacteriology. 1990. Vol. 69, iss. 6. P. 769 – 797.

*Hoch M. E., Kirchman D. L.* Seasonal and interannual variability in bacterial production and biomass in a temperate estuary // Marine Ecology Progress Series. 1993. Vol. 98. P. 283 – 295.

*Jensen L. M.* Phytoplankton release of extracellular organic carbon, molecular weight composition, and bacterial assimilation // Marine Ecology Progress Series. 1983. Vol. 11. P. 39 – 48.

*Obernosterer I., Herndle G. J.* Phytoplankton extracellular release and bacterial growth : dependence on the inorganic N:P ratio // Marine Ecology Progress Series. 1995. Vol. 116. P. 247 – 257.

*Shiah F. K., Ducklow H. W.* Temperature regulation of heterotrophic bacterioplankton abundance, production, and specific growth in Chesapeake Bay // Limnology and Oceanography. 1994. Vol. 39, iss. 6. P. 1243 – 1258.

## ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИЙ

### VERTICAL DISTRIBUTION OF BACTERIA IN FOREST LAKES OF KARELIA

Nina A. Lapteva and Evgenia A. Sokolova

*I. D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Science  
Borok, Nekouzsky District, Yaroslavl Oblast 152742, Russia*

*E-mail: sokol@ibiw.yaroslavl.ru*

Received 2 February 2017, accepted 3 December 2017

Lapteva N. A., Sokolova E. A. Vertical Distribution of Bacteria in Forest Lakes of Karelia. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2018, no. 2, pp. 222–232 (in Russian). DOI: 10.18500/1684-7318-2018-2-222-232

The total abundance of bacteria, the numbers of saprophytic, oligotrophic and sulfate-reducing microorganisms, the shapes of bacterial cells, the primary and bacterial production, organic matter destruction, and the rate of sulfate reduction were studied in small Karelian lakes during the stagnation period. It is shown that the uneven vertical distribution of light, temperature, oxygen and hydrogen sulfide creates ecological niches for the development of many various groups of microorganisms. In most lakes, the minimum abundance of microorganisms was found in their surface water layer while its maximum was in the near-bottom ones. The trophic status of a waterbody has a great influence on the formation of microbial communities and their functioning. Autochthonic organic matter in closed forest lakes studied (the local term “lamba”) was formed due to phytoplankton photosynthesis but the bacterial production exceeded the primary one in the hypolimnion of eutrophic lakes. The content of hydrogen sulfide, the abundance of sulfate-reducing bacteria, and the rate of sulfate reduction were maximal in the bottom sediments of eutrophic lambas.

*Key words:* Karelian lakes, abundance of microorganisms, production, destruction, sulphate reduction.

DOI: 10.18500/1684-7318-2018-2-222-232

#### REFERENCES

- Arinushkina Y. V. *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv* [Guide on the chemical analysis of soils]. Moscow, Izdatel'stvo MGU, 1961. 491 p. (in Russian).
- Gorlenko V. M., Dubinina G. A., Kuznetsov S. I. *Ecology of Aquatic Organisms*. Moscow, Nauka Publ., 1977. 289 p. (in Russian).
- Dubinina G. A. Study of the Ecology of Iron Bacteria in Fresh Water Bodies. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Biol.*, 1976. iss. 4, pp. 575–592 (in Russian).
- Kopylov A. I., Kosolapov D. B. *Bakterioplankton vodokhranilishch Verkhney i Srednei Volgi* [Bacterioplankton of the Upper and Middle Volga reservoirs]. Moscow, Izdatel'stvo Sovremen-nogo Gumanitarnogo Universiteta, 2008. 377 p. (in Russian).
- Kuznetsov S. I. *The Microflora of Lakes and its Geochemical Activity*. Leningrad, Nauka Publ., 1970. 440 p. (in Russian).
- Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. *Metody izucheniya vodnykh mikroorganizmov* [Methods of Studying of Water Microorganisms]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 288 p. (in Russian).

Kuznetsov S. I., Saralov A. I., Nazina T. N. *Microbiological processes of Turnover of Carbon and Nitrogen in Lakes*. Moscow, Nauka Publ., 1985. 213 p. (in Russian).

Lapteva N. A. Electron microscopic study of the microflora of the Rybinsk reservoir. *Mikrobiologiya*, 1976, vol. 45, pp. 547–550 (in Russian).

*Opredelitel' bakteriy Berdzhi* [The determinant of Berjee bacteria]. J. Hoult, N. Krieg, P. Snit, J., Staley, S. Williams, eds. Moscow, Mir Publ., 1997, vol. 2. 368 p. (in Russian).

Romanenko V. I., Kuznetsov S. I. *Ekologiya mikroorganizmov presnykh vodoemov* [Ecology of Microorganisms of Fresh Water Bodies]. Leningrad, Nauka Publ., 1974. 194 p. (in Russian).

Romanenko V. I., Rybakova I. V., Sokolova Ye. A., Layosh Veresh. The variant of the diffusive method of definition of free carbonic dioxide, carbonates and sulphides in water and bottom sediments in the occluded bottle. *Hydrobiological J.*, 1990, vol. 26, iss. 5, pp. 64–69 (in Russian).

Sorokin Yu. I. Primary production and microbiological processes in the lake Heck-Gel. *Mikrobiologiya*, 1968, vol. 37, no. 2, pp. 345–354 (in Russian).

Kharkevich N. S. Materials on Small Forest Lakes (Lamps of Karelia). *Proceedings Karelsk Phil. of the USSR Academy of Sciences*, 1960, vol. 27, pp. 70–133 (in Russian).

Fliermans J. G., Schneider C. P., Schmidt E. L. Direct measurement of bacterial stratification in Minnesota lakes. *Archiv of Hydrobiology*, 1975, vol. 76, pp. 248–255.

Gibson G. R. Physiology and ecology of the sulfate-reducing bacteria. *J. of Applied Bacteriology*, 1990, vol. 69, iss. 6, pp. 769–797.

Hoch M. E., Kirchman D. L. Seasonal and interannual variability in bacterial production and biomass in a temperate estuary. *Marine Ecology Progress Series*, 1993, vol. 98, pp. 283–295.

Jensen L. M. Phytoplankton release of extracellular organic carbon, molecular weight composition, and bacterial assimilation. *Marine Ecology Progress Series*, 1983, vol. 11, pp. 39–48.

Obernosterer I., Herndl G. J. Phytoplankton extracellular release and bacterial growth: dependence on the inorganic N:P ratio. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, vol. 116, pp. 247–257.

Shiah F. K., Ducklow H. W. Temperature regulation of heterotrophic bacterioplankton abundance, production, and specific growth in Chesapeake Bay. *Limnology and Oceanography*, 1994, vol. 39, iss. 6, pp. 1243–1258.