

УДК [574.5:574.63](213.55)

Д. Саркар¹, С. Лахири², Б. Б. Джана³

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ И ПОТЕНЦИАЛА МИКРОВОДОРОСЛЕЙ К СВЯЗЫВАНИЮ УГЛЕРОДА ПО ГРАДИЕНТУ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В СИСТЕМЕ ТРОПИЧЕСКИХ ПРУДОВ-ОТСТОЙНИКОВ*

Оценка экологической целостности, заключающаяся в оценке пространственной и сезонной изменчивости видового разнообразия и обилия микроводорослей, бактерий биогеохимического цикла и потенциала микроводорослей к связыванию углерода, была проведена в связи с качеством воды в системе шести прудов, используемых для биологической очистки муниципальных сточных вод и разведения рыб. Значения индекса разнообразия Шеннона синезеленых, евленовых и золотистых были выше в верхних — прудах биологической очистки (ПБО), а зеленых и диатомовых — в нижних прудах каскада, используемых для разведения рыб (РП). Валовая и чистая первичная продукция фитопланктона в ПБО и РП изменялась в пределах соответственно 3,59—32,86 и 2,34—15,23 мг С·м⁻²·сут⁻¹. Отношение P/R в разных прудах составляло от 1,37 до 5,73. Количество гетеротрофных, аммонифицирующих и фосфат-растворяющих бактерий в поверхностном и придонном слоях воды и верхнем слое донных отложений уменьшалось от ПБО до последнего в каскаде РП. Сумма оптимальных для роста рыб показателей также изменялась в пространстве, демонстрируя две четко различающиеся зоны: ПБО, где доминировали синезеленые водоросли с более высоким потенциалом к связыванию углерода, и РБ, где благодаря выеданию зоопланктоном микроводорослей и микробной детритной пищевой цепи формируется благоприятная среда для культивирования рыб.

Ключевые слова: связывание углерода, пруды, продуктивность, индексы разнообразия, бактерии биогеохимического цикла.

В зависимости от относительной активности метаболизма биоплато могут выступать в качестве потребителя или источника атмосферного углерода. Их роль в экосистеме в большей степени направлена на охрану окружающей среды, особенно с точки зрения доочистки сточных вод и использования биомассы микроводорослей в пищевой цепи, а также снижения поступления парниковых газов в атмосферу. Экологическая целостность заключается в согласованном функционировании микроводорослей, высших водных растений, бактерий, зоопланктона, макробеспозвоночных, позвоночных на фоне оптимальных физико-химических показателей водной среды и

* Исследования проведены в рамках гранта Индийского центра сельскохозяйственных исследований (Нью Дели), предоставленного Б.Б. Джане.

© Д. Саркар, С. Лахири, Б. Б. Джана, 2018

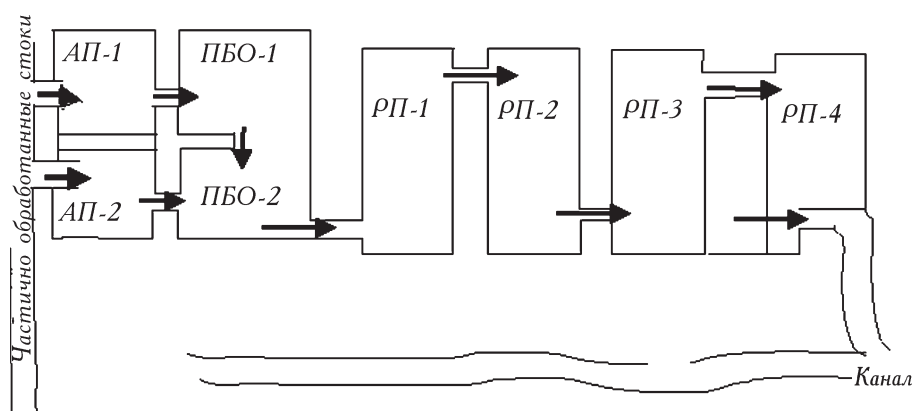
донных отложений, конструктивных особенностей биоплато и других внешних факторов. Взаимодействие разных компонентов в значительной степени определяет пространственно-временную сукцессию сообществ микроводорослей и бактерий и их вклад в ассимиляцию CO_2 . Исследования показали, что эффективность фотосинтеза у *Chlorella* sp. (5,1—47,0%) значительно выше, чем у *Anthrospira (Spirulina)* (2,0—5,5%) [3]. Возрастание концентрации CO_2 от 5 до 20% насыщения и выше приводило к резкому замедлению роста микроводорослей [13, 24], в то же время есть данные о том, что некоторые штаммы хорошо развиваются при 30—70% насыщения [8—10, 21]. Одноклеточные зеленые водоросли могут ассимилировать CO_2 в количестве, на три порядка превышающем его содержание в воздухе (0,036%) [16]. Фотосинтетическая эффективность микроводорослей составляет 10—20%, в то время как большинства наземных растений — 1—2% [20]. В экспериментах в условиях контролируемого pH и подачи достаточного количества CO_2 в культуральную среду возможно достичь устойчивого роста водорослей даже при 100%-ном насыщении CO_2 [16]. Известно, что некоторые виды микроводорослей способны удвоить биомассу за весьма короткое время — 3,5 ч [21].

Благодаря постоянному обогащению биогенными элементами, в системах доочистки сточных вод создаются оптимальные условия для массового развития микроводорослей, поглощающих CO_2 [9]. Самоочистительный потенциал биоплато обеспечивается структурными и функциональными взаимодействиями с другими элементами системы биологической очистки сточных вод. Такие биоплато характеризуются постоянной подпиткой биогенными элементами, экологической «чистотой», энергозависимостью лишь от солнечной радиации, взаимосвязанными и взаимодействующими экологическими процессами [4], в частности минерализации органических веществ [2]. Таким образом, они обеспечивают возможности исследования углерод-ассимилирующего потенциала различных микроводорослей в градиенте доочистки сточных вод.

Предполагается, что доочистка обогащенных биогенами сточных вод в каскаде отстойников приводит к изменениям в структуре и функционировании благодаря взаимодействию разных подсистем — первичной, вторичной и микробиальной с физико-химической средой. Первичная подсистема ассимилирует атмосферный углерод посредством фотосинтеза водорослей, который, в свою очередь, зависит от наличия биогенных элементов в вышерасположенном участке и влияет на качество воды нижерасположенного. Видовой состав фитопланктона значительно влияет на степень утилизации углерода в системе биоплато. Кроме того, в этот процесс вовлечены вторичное звено пищевой цепи и бактериальное сообщество.

Цель исследования — оценить функционирование водорослевого сообщества, бактериального населения и потенциал к поглощению углерода в градиенте биологической доочистки сточных вод.

Материал и методика исследований. Исследования были проведены в два этапа (1998—2000 и 2003—2005 гг.) в системе доочистки муниципальных сточных вод г. Кальяни (Западная Бенгалия, Индия), общая численность на-



1. Схема системы очистки сточных вод г. Кальяни. ПБО — пруд биологической очистки; РП — рыбоводный пруд.

селения — около 100 тыс. Суточное поступление сточных вод достигает 17 млн. л, из них 11 подвергается биологической очистке на каскаде шести прудов общей длиной 826 м (рис. 1). Средняя скорость прохода сточных вод составляет $2 \cdot 10^6$ л/сут, поток регулируется шлюзом, установленным в месте выпуска стоков из анаэробного резервуара в два параллельно расположенных пруда биологической очистки (ПБО). Ниже последовательно расположено четыре рыбоводных пруда (РП), используемых для выращивания индийского карпа. После достижения требуемого качества, стоки сбрасываются в р. Ганг.

Во время первого этапа (1998—2000) исследования касались пространственно-временного распределения некоторых бактерий биогеохимического цикла. Второй этап был посвящен оценке разнообразия, обилия, первичной продуктивности, потенциала фитопланктона к ассимиляции углерода, качества воды и роста рыб.

Для определения бактерий различных трофических групп и установления параметров качества, пробы воды из поверхностного и придонного горизонтов и донных отложений отбирали ежемесячно в двух ПБО и четырех рыбозаводных (РП-1, РП-2, РП-3 и РП-4) [1, 18, 27].

Пробы из поверхностного горизонта использовали для определения содержания хлорофилла и первичной продукции скляночным методом [23]. Пробы фитопланктона также отбирали с поверхности с использованием планктонной сети и обрабатывали стандартными методами [1]. Разнообразие фитопланктона рассчитывали по формулам разнообразия Шеннона, индекса доминирования Симпсона и индекса выровненности [14]. Фотосинтетическую эффективность (ФЭ) фитопланктона определяли по формуле:

$$\text{ФЭ} = \text{валовая первичная продукция} / \text{солнечная радиация} \times 100.$$

Среднее значение каждого показателя рассчитывали по 24 пробам из каждого пруда (данные для ПБО усреднены, поэтому рассматриваются пять вариантов вместо шести).

Содержание углерода в биомассе фитопланктона было установлено ее умножением на коэффициент 0,1 [11]. Общее содержание углерода в экосистеме рассчитывали, исходя из значений содержания органического углерода в донных отложениях и общего содержания неорганического углерода (свободный CO_2 + карбонат + гидрокарбонат) в воде, выраженное в граммах С и умноженное на коэффициент 0,12.

Диапазон оптимальных значений для роста рыб определяли на основании частоты оптимальных значений разных показателей (рН, содержание растворенного кислорода, фосфатов, аммонийного и нитратного азота, рыбной продукции) в каждом пруду. Эти данные использованы для оценки эффективности очистки сточных вод для культивирования рыб. Все данные были обработаны статистически с использованием соответствующих программ. Различия между прудами считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты исследований

Первичная продукция фитопланктона. Значения валовой первичной продукции фитопланктона (A), чистой продукции (P) и деструкции (R) в ПБО были существенно выше, чем РП, в сезонном аспекте A , P и R значительно выше летом, чем в другие сезоны (табл. 1). Отношение валовой первичной продукции и деструкции в ПБО колебалось в пределах 0,39—8,60, а в РП — 0,73—20,24 (см. табл. 1). Это значение превышало 1 в 69—73% случаев в ПБО и в 91—100% случаев в РП, что говорит о превалировании процессов продукции в РП.

Содержание хлорофилла a в фитопланктоне подвержено значительным колебаниям, составляя в разных прудах от 9,84 до 6567,3 мг/м^3 (табл. 2). Минимальное и максимальное значения зарегистрированы соответственно в ПБО и последнем РП. Фотосинтетическая эффективность в ПБО была значительно выше, чем в РП (соответственно 2,76—28,84 и 0,053—13,45).

Структура фитопланктона. Наиболее широко были представлены зеленые водоросли, в прудах отмечено по 12—14 таксонов. Практически везде встречались виды родов *Scenedesmus*, *Microspora*, *Selenastrum*, *Crucigenia*, *Chlorella*, *Chlamydomonus*. Виды родов *Ankistrodesmus* и *Oocystis* отмечены в двух ПБО, но отсутствовали во всех РП (рис. 2). Синезеленые в ПБО были представлены видами семи родов, а в последнем РП — лишь двумя. Диатомовые включали виды трех — шести родов. Во все прудах встречались представители *Nitzschia* и *Cyclotella*. Золотистые были представлены родом *Synura*, который достигал массового развития в ПБО и нижнем РП.

В целом значения индекса разнообразия Шеннона синезеленых и евгленовых были выше в НПБО, чем в РП ($p < 0,05$), а зеленых и диатомовых — наоборот. Значения индекса Симпсона разных отделов водорослей в разных прудах практически не различались, за исключением евгленовых. Значения

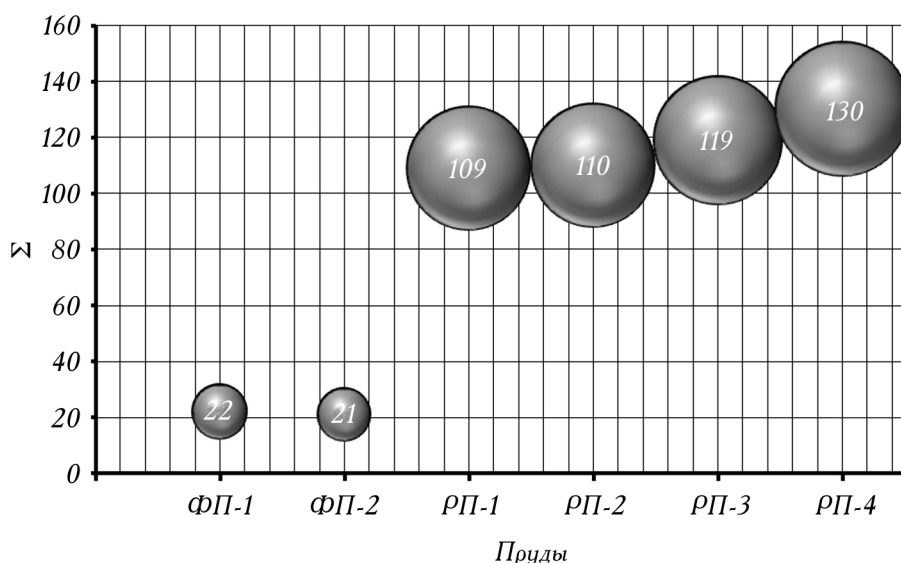
1. Валовая (A) и чистая (P) первичная продукция и деструкция (R) в исследованных прудах (n = 24)

	ПБО			РП-1			РП-2			РП-3			РП-4		
	Λ	М	З	Λ	М	З	Λ	М	З	Λ	М	З	Λ	М	З
A	32,86	17,91	25,57	11,01	3,59	5,46	11,37	4,54	6,11	10,91	4,47	5,23	8,76	4,02	4,63
P	21,63	9,87	15,23	7,69	2,35	4,26	3,29	3,25	3,92	6,24	2,69	3,13	5,24	2,46	3,05
R	11,23	8,04	10,35	3,32	1,24	1,20	4,05	1,29	2,19	4,67	1,78	2,39	3,52	1,56	1,73
P/R	2,16	2,18	2,27	2,67	4,91	3,58	2,03	2,61	1,69	1,37	2,00	2,46	1,74	2,25	5,73

Примечание. Здесь и в табл. 2—4: ПБО — пруды биологической очистки; РП — рыбоводные пруды. Λ — лето; М — сезон муссонов; З — зима

2. Пределы колебаний и среднее значение ($\pm SE$) численности фитопланктона (N, млн. кл/м³), содержания хлорофилла-а (Хл-а, г/м³), биомассы фитопланктона (B, г/м³) и содержания углерода в биомассе (C, г C/м³) в исследованных прудах

Показатели	ПБО		РП-1		РП-2		РП-3		РП-4	
	lim	M \pm SE	lim	M \pm SE	lim	M \pm SE	lim	M \pm SE	lim	M \pm SE
N	15,71—372,85	295,78	6,79—175,00	127,71	6,35—150,08	124,01	6,19—74,33	56,41	4,48—77,20	63,03
Хл-а	193,4—6567,3	1253,2 \pm 125,3	9,84—968,9	326,6 \pm 32,7	53,9—2365,7	467,8 \pm 46,7	76,4—1163,1	352,3 \pm 34,8	37,4—1023,1	300,3 \pm 30,6
B	31,8—1083,6	206,8 \pm 200,4	1,6—159,9	53,9 \pm 4,9	8,9—393,3	77,2 \pm 7,2	12,6—191,9	58,1 \pm 5,7	6,2—168,8	49,5 \pm 4,7
C*	9,6—328,4	62,7	0,5—48,4	16,3	2,7—118,3	23,4	3,8—58,2	17,6	1,9—51,2	15,0
C**	7,6—256,2	49,0	0,46—37,9	12,8	2,2—92,3	18,3	3,1—45,4	13,8	1,5—40,0	11,8



2. Диапазон суммы оптимальных значений параметров качества воды (Σ рН + содержание растворенного кислорода + фосфатов + азота аммонийного + азота нитратного + рыбопродуктивность) в исследованных прудах.

индекса выровненности синезеленых, диатомовых и евгленовых в разных прудах были близкими.

Обилие фитопланктона. Общая численность фитопланктона в прудах колебалась в пределах 19,90—96,34 млн. кл/м³. Средняя численность в ПБО (95,33—96,34 млн. кл/м³) на 138—380% выше, чем в РП (19,90—45,41 млн. кл/м³). Пространственное распределение численности было аналогично распределению встречаемости, т. е. виды с высокой численностью доминировали в ПБО, но были менее обильны в РП.

Биомасса фитопланктона. Значения сухой массы были в пределах 1,6—206,8 г/м³ (табл. 3). Вклад мега- и нанопланктона составлял соответственно 6,25—8,00 и 92,00—93,75%. В ПБО биомасса фитопланктона значительно выше, чем в РП.

Бактериальное сообщество. Количество гетеротрофных (ГБ), аммонифицирующих (АБ), фосфат-растворяющих (ФБ) бактерий в поверхностном и придонном слоях воды и в верхнем слое донных отложений снижалось от ПБО к нижнему РП (табл. 4). Так, численность ГБ снижалась на 73—88%, а АБ — 74—85%. Численность аммонийокисляющих (АмБ) и денитрифицирующих (ДБ) бактерий, наоборот, возрастала от БПО к нижнему в каскаде РП. Аналогично, хотя и менее выражено, изменялась и численность бактерий, разрушающих целлюлозу (ЦРБ) (табл. 4).

Качество воды. Анализ качества воды показал заметное возрастание значений рН и содержания растворенного в воде кислорода по каскаду пруд-

3. Пределы колебаний и среднее значение ($\pm SE$) сухой массы ($г/м^3$) мега-, нано- и фитопланктона в целом ($n = 24$) в исследованных прудах

Пруды	Фитопланктон		Мега-фитопланктон		Нано-фитопланктон	
	lim	$M \pm SE$	lim	$M \pm SE$	lim	$M \pm SE$
ПБО	31,8—1083,6	206,8 \pm 20,0	2,5—51,0	15,2 \pm 1,4	29,2—611,9	173,4 \pm 17,3
РП-1	1,6—159,9	53,9 \pm 48,7	0,1—128,0	4,4 \pm 0,4	1,5—148,7	47,7 \pm 4,6
РП-2	8,9—390,3	77,2 \pm 7,2	0,9—28,1	5,8 \pm 0,6	8,0—362,2	68,8 \pm 6,5
РП-3	121,6—191,9	58,1 \pm 5,7	0,5—13,4	4,1 \pm 0,4	11,5—178,5	52,1 \pm 5,0
РП-4	6,2—168,8	49,5 \pm 4,7	0,3—12,3	3,1 \pm 0,3	5,6—162,1	45,0 \pm 5,0

дов. Содержание растворенного кислорода было в пределах 5,03—12,05 мг O_2 /л. Концентрация форм минерального азота (аммонийного, нитритного и нитратного) в ПБО была существенно выше, чем в РП.

Общий углерод и углерод фитопланктона. Содержание общего углерода в экосистеме (сумма органического углерода донных отложений и неорганического углерода воды) снижалось от 15,5 г $C/м^2$ в ПБО до 1,24 г $C/м^2$ в нижнем РП. Аналогично снижалось и содержание углерода фитопланктона — соответственно 198,8 и 49,4 г $C/м^2$.

Доочистка сточных вод. Сравнение показателей качества воды показало, что оно зависело от расстояния от выпуска стоков и улучшалось по мере прохождения по каскаду, достигая максимальных значений в нижнем РП (рис. 2).

Обсуждение результатов исследований

Считается, что экологическая целостность является функцией пространственно-временной динамики обилия фитопланктона, зоопланктона, биомассы бактерий, макробеспозвоночных и абиотических условий. Обилие фитопланктона, оцененное по частоте встречаемости и индексам разнообразия, очевидно зависело от альго-бактериальной утилизации биогенных элементов, в результате чего в градиенте доочистки формировались благоприятные условия. Доочистка сточных вод происходила благодаря функционированию различных подсистем, таких, как автотрофная (зависящая от солнечной радиации) и гетеротрофная (животные и микроорганизмы). Функционально это достигалось взаимодействием автотрофного продуцирования, гетеротрофной деградации, симбиоза и антагонизма, отношений в системе хищник — жертва и других биологических процессов. Эти функции взаимосвязаны, взаимозависимы и взаимодополняемы. Синезеленые водоросли считаются индикатором евтрофикации водоема, а зеленые — его

4. Пределы колебаний и среднее значение численности бактерий разных трофических групп в поверхностном (П) и придонном (Д) слое воды исследованных прудов

Группы	ПБО		РП-1		РП-2		РП-3		РП-4	
	lim	М	lim	М	lim	М	lim	М	lim	М
АБ П	1,8—164,3	80,3	1,3—113,8	47,8	0,5—103,5	34,9	0,4—74,0	28,2	0,4—53,5	20,2
А Д	6,3—557,3	226,6	3,82—62,9	120,0	1,9—174,8	85,7	1,9—156,8	72,0	1,7—128,5	50,0
ДБ П	4,1—63,3	26,2	5,4—50,4	25,3	1,7—70,4	34,9	7,8—64,1	41,9	9,4—96,8	24,0
А Д	17,8—692,0	165,8	10,1—503,7	109,7	13,6—613,0	150,7	18,4—769,0	183,2	23,9—910,5	239,6
ГБ П	2,3—480,3	120,6	1,4—179,4	62,7	1,0—67,5	44,4	0,8—106,5	36,8	0,5—52,1	27,7
А Д	7,2—1007,5	210,3	5,0—471,5	131,0	3,2—102,0	95,1	3,0—105,6	76,2	2,6—76,0	54,5
ЦБ П	0,8—72,5	43,2	0,7—76,5	31,3	0,7—67,2	40,6	2,0—87,5	45,7	0,8—95,8	50,5
А Д	2,3—140,6	75,6	1,3—97,5	53,7	1,5—113,5	63,7	2,6—136,9	70,2	2,9—150,4	77,4
ФБ П	1,5—162,5	59,6	1,0—85,3	36,7	0,7—64,3	26,6	0,3—46,3	21,6	0,3—44,5	15,1
А Д	3,1—328,0	121,2	1,5—131,5	65,9	1,4—89,2	36,5	0,4—68,9	29,0	0,5—44,4	18,5
АмБ П	8,3—54,8	34,0	6,8—50,8	25,7	9,0—65,2	39,4	12,5—74,6	47,0	13,8—80,0	56,2
А Д	18,8—85,8	57,0	9,6—73,8	44,2	13,8—120,5	68,5	18,4—133,4	79,0	17,9—145,2	86,0

Примечание. АБ — аммонифицирующие бактерии; ДБ — денитрифицирующие бактерии; ГБ — гетеротрофные бактерии; ЦБ — целлюлозорасщепляющие бактерии; ФБ — фосфат-растворяющие бактерии; АмБ — аммоний-окисляющие бактерии.

«здоровья», однако большое количество видов широко распространены в водоемах разного трофического статуса и качества воды. Кроме автотрофных, важную роль в экосистеме играют и гетеротрофные водоросли, которые наряду с фотосинтезом используют и легкодоступные органические вещества в форме аминокислот [22].

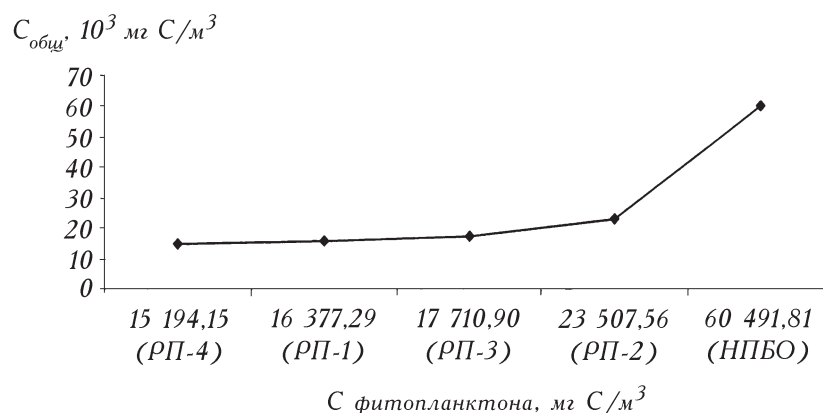
Разные группы бактерий биогеохимического цикла, участвующие в разложении и минерализации органических веществ, различаются по потребности в биогенных элементах, что сказывается на их содержании в воде и, следовательно, на составе и обилии микроводорослей в градиенте доочистки сточных вод [12].

ПБО высокоевтрофированы, характеризуются обилием (вплоть до цветения) синезеленых водорослей. Количество углерода, связанное планктонными синезелеными водорослями в разные месяцы в разных прудах, оценивается значениями от 0,5 до 25,6 г С/м³. Углерод-связывающий потенциал фитопланктона значительно изменяется во времени в зависимости от состава и обилия сообщества. Благодаря функционированию бактерий биогеохимического цикла, в РП формировались благоприятные условия для более активной ассимиляции углерода зелеными водорослями. Углерод-ассимилирующий потенциал синезеленых водорослей исследованной системы был гораздо выше, чем в Средиземной море (25 мг/м³) [7].

Карбонатно-бикарбонатная буферная система особенно важна в природных системах [26]. Состав водорослевых сообществ часто зависит от содержания основных ионов и значения рН [17]. В наших исследованиях значение рН практически все время было в пределах 6,0—8,0, то есть микроводоросли утилизировали растворенный диоксид углерода для фотосинтеза, тем самым используя атмосферный углерод.

Как и ожидалось, содержание углерода в фитопланктоне непосредственно зависело от его общего содержания в исследованной системе (рис. 3). В то же время соотношение «водорослевого» и общего углерода минимально в ПБО и увеличивалось до максимума в последнем РП. Содержание «водорослевого» углерода связано с его общим содержанием в системе или содержанием органического углерода в донных отложениях. Показано, что углерод-связывающий потенциал фитопланктона зависит от его видового состава [3].

В результате доочистки сточные воды становились пригодными для развития фитопланктона, используемого для питания рыб. Таким образом, в системе выделяются две обособленные зоны: первая — ПБО с доминированием синезеленых водорослей и высоким углерод-связывающим потенциалом, и РП, в которых доминируют зеленые водоросли, развивающиеся в доочищенной воде. Это позволяет предположить, что углерод-связывающий потенциал неодинаков в разных прудах и в разные сезоны, то есть варьировал в пространстве и времени в зависимости от содержания биогенных элементов, качества воды, видового состава и фотосинтетической активности фитопланктона.



3. Отношение содержания углерода в фитопланктоне и его общего содержания в системе прудов.

Доочистка сточных вод наиболее активна в ПБО — 22—69%. В результате анаэробного разложения органических веществ возникают некоторые промежуточные токсичные соединения, которые в условиях РП могут быть в окислены до нетоксичных. В то же время было показано что возрастание биомассы связано с улучшением условий [5], а возрастание содержания хлорофилла — с изменениями в пигментном составе и пространственными или временными закономерностями доминирования отдельных видов [10].

Заключение

Исследование разнообразия и обилия фитопланктона в каскаде прудов по градиенту доочистки сточных вод в течение четырех лет показали наличие двух четко различающихся зон: ПБО с доминированием синезеленых водорослей и максимальным потенциалом к связыванию углерода, и нижерасположенных РП, где благодаря комплексу мер по доочистке формируется благоприятная среда для культивирования рыб.

Обилие бактерий, участвующих в круговороте биогенных элементов, влияет на их содержание и, следовательно, на разнообразие и обилие водорослей по градиенту доочистки сточных вод. Эффективность очистки стоков в ПБО наиболее изменчива, она составляет 22—69% общей эффективности.

Доочистка сточных вод происходит с участием автотрофной и гетеротрофной (животные и бактерии) подсистем, благодаря активности которых происходит разложение и окисление, а также осаждение и хелатирование, что ведет к улучшению качества воды посредством механизмов обратной связи.

**

Досліджено зміни видового складу, чисельності, продуктивності фітопланктону, а також його потенціалу до асиміляції вуглецю, складу бактеріального населення та якості води у каскаді ставків доочищення муніципальних стічних вод м. Кальяні (Індія). Показана наявність двох зон — ставків біологічного очищення з домінуван-

ням синьозелених водоростей, та нижчерозташованих рибооводних ставків, де формується сприятливе середовище для культивування риб.

**

Phytoplankton diversity and abundance, productivity and carbon-assimilating potential, as well as composition of bacteria and water quality parameters were studied in the cascade of the municipal water reclamation ponds. Presence of two clear zones was shown — of the facultative ponds, dominated by blue-green algae, and the fish (maturation) ponds, dominated by green algae, where environment was favorable for fish culture.

**

1. APHA Methods for the examination of water and waste water. 21st ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. — Washington, DC, 2005. — 8 p.
2. Brassington R. Finding waters — guide to the construction and maintenance of private water supplies. — John Wiley and Sons Ltd., 1995. — 416 p.
3. Carlsson A.S., van Beilen J.B., Möller R., Clayton D., Micro- and macro-algae: utility for industrial applications. Ed. by D. Bowles. — Outputs from the EPOBIO project, 2007. — 82 p.
4. Cooke W.B. Fungi in sewage // Recent advances in aquatic mycology / Ed. by B. G. Jone. — London: Acad. Press, 1976. — P. 389—434.
5. Felip M., Catalan J. The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake: decoupling in their spatial and temporal maxima // J. Plank. Res. — 2000. — Vol. 22, N 1. — P. 91—105.
6. Gotsis-Skretas O., Ignatiades L. Phytoplankton Carbon-Biomass in the Mediterranean Sea // Rapp. Comm. Int. Mer Médit, 2010. — P. 339—369.
7. Hanagata N., Takeuchi T., Fukuju Y. et al. Tolerance of micro-algae to high CO₂ and high temperature // Phytochemistry. — 1992. — Vol. 31. — P. 3345—3348.
8. Hsueh H.T., Chu H., Yu S.T. A batch study on the bio-fixation of carbon dioxide in the absorbed solution from a chemical wet scrubber by hot spring and marine algae // Chemosphere. — 2007. — Vol. 66. — P. 878—886.
9. Iwasaki I., Kurano N., Miyachi S. Effects of high-CO₂ stress on photosystem II in a green alga, *Chlorococcum littorale*, which has a tolerance to high CO₂ // J. Photochem. Photobio. — 1996. — Vol. 36 B. — P. 327—332.
10. Khoeyi Z. A., Seyfabadi J., Ramezanpur Z. Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the micro-algae, *Chlorella vulgaris* // Aqua. Internat. — 2011. — Vol. 20. — P. 41—49.
11. Janik J. J., Taylor W.D. Estimating phytoplankton biomass and production // Environmental & water quality operational studies. — 1981. — W 34m NE-81-2 C4.
12. Lahiri-Ganguly S., Sarkar-Paria D., Jana B.B. Evaluating the ecological resilient driven performance of a tropical waste stabilization pond system using ecological signature of biological integrity // J. Ecol. Eng. — 2015. — Vol. 16, N 3. — P. 97—107.
13. Lee J.S., Lee J.P. Review of advances in biological CO₂ mitigation technology // Biotech. Bioprocess. Engin. — 2003. — Vol. 8. — P. 354—359.

14. *Odum E., Brewer R., Barratt G.W.* Fundamentals of ecology. — Boston: Cengage Learning, 2004. — 624 p.
15. *Olaizola M.* Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace // *Biomol. Eng.* — 2003. — Vol. 20. — 459—466.
16. *Papazi A., Makridis P., Divanach P., Kotzabasis K.* Bioenergetic changes in the microalgal photosynthetic apparatus by extremely high CO₂ concentrations induce an intense biomass production // *Physiol. Plan.* — 2008. — Vol. 132. — P. 338—349.
17. *Patrick R.* Ecology of freshwater diatoms and diatom communities // *The Biology of Diatoms. Botanical monographs* / Ed. by D. Werner. — Berkeley: University of California Press, 1977. — P. 284—332.
18. *Rodina A.G.* Methods in aquatic microbiology. — Baltimore; London: University Park Press, 1973. — 461 p.
19. *Rosso D., Stenstorm M.K.* The carbon sequestration potential of municipal wastewater treatment // *Chemosphere.* — 2008. — Vol. 70. — P. 1468—1475.
20. *Singh U.B., Ahluwalia A.S.* Microalgae: a promising tool for carbon sequestration // *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* — 2013. — Vol. 18. — P. 73—95.
21. *Sung K.D., Lee J.S., Shin C.S. et al.* CO₂ fixation by *Chlorella* sp. KR-1 and its cultural characteristics // *Bioresour. Technol.* — 1999. — Vol. 68. — P. 269—273.
22. *Tuchman N.C.* The role of heterotrophy in algae // *Algal ecology — freshwater benthic ecosystems* / Ed. by M.L. Stevenson, R.J. Bothwell, R.L. Lowe. — San Diego: Calif. Acad. Press, 1996. — P. 299—319.
23. *Vollenweider R.A.* A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments. — Oxford; London: Blackwell Sci. Publ., 1974. — 213 p.
24. *Watanabe Y., Ohmura N., Saiki H.* Isolation and determination of cultural-characteristics of micro-algae which function under CO₂ enriched atmosphere // *Ener. Conver. Manag.* — 1992. — Vol. 33. — P. 545—552.
25. *Wetzel R.G.* Limnology. — London: Acad. Press, 2001. — 1006 p.
26. *Wetzel R., Likens G.E.* Limnological analyses. — New York: Springer Verlag, 1991. — 1006 p.

¹Международный центр экологического планирования и
Отдел экологического менеджмента,
Университет Кальяни, Индия

²Отдел зоологии Государственного колледжа
Чандарнагора, Хуули, Индия

³Центр охраны природы и развития
человеческих ресурсов, Кальяни, Индия

Поступила 21.09.17