

УДК 579.26:579.63

## ОЦЕНКА САНИТАРНОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕКРЕАЦИОННЫХ ВОДОЕМОВ ПО ЧИСЛЕННОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ

Михеев П.В.

Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, Мытищи,  
e-mail: pvm-fscg@yandex.ru

Изучена численность микроорганизмов в поверхностных слоях донных осадков водохранилищ, прудов, рек в трех областях центральной России. Приведены данные о санитарно-микробиологическом состоянии донных осадков в мелководной прибрежной зоне водоемов, используемых для купания, рыбалки и отдыха населения. Общая численность сапрофитных и потенциально патогенных бактерий в донных осадках была повышенной ( $1\text{-}5 \times 10^6$  КОЕ/г) по сравнению с другими водоемами в р. Москва и Яуза в черте города, и в рыбноводном пруду с экстенсивной формой рыбоводства. Несмотря на принципиально иную структуру донных осадков по сравнению с почвами, в них была высока численность спорных аэробных бактерий и актиномицетов. Численность плесневых грибов в осадках была низкой ( $1\text{-}8 \times 10^2$  КОЕ/г) по сравнению с почвами, окружающими эти водоемы. К категории «загрязненных» с эпидемической точки зрения следует отнести донные осадки, в которых численность колиформных бактерий превышает 1000 кл/г, а численность *E. coli* и *Enterococcus spp.* – порядка 10–100 кл/г сырого ила. Оценено санитарное состояние водоемов по численности колиформных бактерий, *E. coli*, *Enterococcus spp.*, и экологическое состояние по численности аэробных сапрофитных и потенциально патогенных бактерий. Полученная оценка совпадает для водоемов, испытывающих высокую антропогенную нагрузку.

**Ключевые слова:** рекреационные водоемы, антропогенное загрязнение водоемов, условно-патогенные бактерии, эпидемическая опасность донных осадков

## ASSESSMENT OF SANITARY AND ECOLOGICAL STATE OF RECREATIONAL RESERVOIR BY THE NUMBER OF MICROORGANISMS IN BOTTOM SEDIMENTS

Mikheev P.V.

F.F. Erisman Federal Scientific Centre of Hygiene, Mytishchi, e-mail: pvm-fscg@yandex.ru

The number of microorganisms in the surface layers of bottom sediments of reservoirs, ponds, rivers in three regions of central Russia was studied. Data on the sanitary-microbiological state of bottom sediments in the shallow coastal zone of water bodies used for swimming, fishing and recreation are given. The total number of saprophytic and potentially pathogenic bacteria in the bottom sediments was increased ( $1\text{-}5 \times 10^6$  CFU/g) compared to other reservoirs in the Moscow and Yauza rivers within the city, and in a fish pond with an extensive form of fish farming. Despite the fundamentally different structure of bottom sediments compared to soils, they had a high number of spore aerobic bacteria and actinomycetes. The number of molds in the sediments was low ( $1\text{-}8 \times 10^2$  CFU/g) compared with the soils surrounding these bodies of water. The category of «contaminated» from an epidemic point of view should include bottom sediments, in which the number of coliform bacteria exceeds 1000 cells/g, and the numbers of *E. coli* and *Enterococcus spp.* – about 10–100 cells/g of raw sludge. The sanitary state of water bodies by the number of coliform bacteria, *E. coli*, *Enterococcus spp.*, and the ecological state by the number of aerobic saprophytic and potentially pathogenic bacteria were estimated. The obtained estimate coincides for reservoirs experiencing a high anthropogenic load.

**Keywords:** recreational water bodies, anthropogenic pollution of water bodies, conditionally pathogenic bacteria, epidemic danger of bottom sediments

Изучение микроорганизмов и геохимических процессов их деятельности в пресноводных водоемах дало обширные знания об участии донных осадков в функционировании водной экосистемы [1]. Для исследования численности микроорганизмов и потоков веществ (в первую очередь – круговорот органического вещества) в пресноводных системах использовали различные методы микроскопических исследований, в том числе на стеклах обрастания и пелоскопах, на селективных питательных средах с идентификацией колоний микроорганизмов, методы оценки ферментативной активности. Применяли современные ме-

тоды радиоизотопных, молекулярно-биологических исследований, изучали химические продукты метаболизма бактерий. Донные осадки уже не рассматриваются как инертное образование или депо химических элементов, так как существует непрерывный обмен веществ между ними и водной толщей.

Существует принципиальное отличие по распределению микроорганизмов в донных осадках озер, рек, водохранилищ в сравнении с почвами, окружающими эти водоемы. Критическими областями в почвенном профиле являются подстилка и область опада, затем – аэрируемый слой почвы

с развитой корневой системой растений, и области ниже уровня почвенных вод [2]. Основными группами микроорганизмов, участвующих в разложении остатков растений, являются эукариотные мицелиальные организмы, аэробные и анаэробные бактерии. Отличительной особенностью иловых отложений является тонкая стратификация физико-химических условий в верхних слоях, граничащих с водной толщей. Доступность кислорода в современных осадках ограничивается слоем в несколько миллиметров или несколько сантиметров в речных песках. В поверхностных слоях иловых осадков преобладают аэробные бактерии, прикрепленные к субстрату, или обладающие скользким движением. Ниже находятся экологические ниши денитрифицирующих бактерий, Mn- и Fe-редукторов, сульфатредукторов и метаногенов.

Представляется значимой роль донных осадков в самоочищении водной среды небольших мелководных водоемов, подвергающихся интенсивному эвтрофированию вследствие загрязнения ливневыми, хозяйственно-бытовыми водами и стоками с полей. Особенно важно изучение микробиологических процессов в осадках для рекреационных водоемов, используемых как место отдыха на воде (лодочный, байдарочный, парусный спорт, туризм и прогулки) и на берегах с купанием в них или без него.

Учет бактерий в донных осадках позволит не только спрогнозировать экологическое состояние водоема, но также оценить его санитарное состояние и возможный риск здоровью населения. В настоящее время отсутствуют санитарно-микробиологические нормативы для донных осадков поверхностных водоемов питьевого назначения, а также для донных осадков водоемов в местах массового отдыха населения.

Цель исследования: дать микробиологическую характеристику донных осадков небольших водохранилищ, прудов, рек, находящихся в условиях антропогенного загрязнения. Оценить роль донного микробного сообщества в формировании качества водной среды с санитарных и экологических позиций.

#### **Материалы и методы исследования**

Объектом исследований являлись донные, в основном песчаные осадки мелководий небольших водохранилищ, прудов и рек, используемых населением для купания, рыбной ловли и отдыха. Отбор проб проводили в летний период в 2015–2019 гг. в Московской, Курской и Белгородской областях.

Точечные пробы поверхностного (0–5 см) слоя осадков отбирали у берега с глубины 0,5 м, или с лодки специальным пробоотборником с глубины 1,0–1,5 м в стерильные емкости и в охлажденном виде (сумка-холодильник) доставляли в лабораторию. Максимальное время от отбора до проведения анализа составило трое суток для проб донных осадков из Курской и Белгородской областей. Численность быстрорастущих сапрофитных и потенциально патогенных бактерий определяли на питательном агаре при 37 °С в течение суток, численность актиномицетов – на крахмало-аммиачном агаре, численность плесневых грибов – на среде Чапека, численность колиформных бактерий – на среде Эндо, численность *E. coli* – по характерному росту на хромогенном агаре, образованию кислоты и газа на лактозной среде при 44 °С, численность энтерококков – на агаре с канамицином, эскулином и азидом натрия. Численность патогенных бактерий родов *Salmonella*, *Shigella* выявляли в 10 г навеске донного осадка методом обогащения с высевом на висмут сульфит агар и SS – агар с идентификацией до рода. Споры аэробных бактерий и сульфитредуцирующих клостридий (*Clostridium perfringens*) выявляли из прогретых при 75 °С в течение 20 мин разведений донных осадков. Воду для микробиологического анализа отбирали одновременно с донными осадками из водоисточников, где была возможность быстрой доставки пробы в лабораторию для анализа по показателям ОМЧ и ОКБ/ТКБ.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Количественные показатели численности активно растущих на питательных средах микроорганизмов приведены в таблице.

Несмотря на принципиально иную структуру донных осадков по сравнению с почвами, в них была высока численность спорных аэробных бактерий и актиномицетов. Численность плесневых грибов была низкой ( $1-8 \times 10^2$  КОЕ/г) по сравнению с почвами береговой полосы, в которых микромицеты отвечают за минерализацию растительного опада [3]. Общая численность сапрофитных и потенциально патогенных бактерий в донных осадках была повышенной в р. Москва и Яуза в черте города, а также в рыбноводном пруду, используемом для купания (без кормления рыбы).

Следует учесть некоторые особенности донных осадков, которые отмечены ранее в наших исследованиях.

Численность микроорганизмов в донных осадках водоемов

*	Группы микроорганизмов							
	Сапрофиты, КОЕ/г	Споры, КОЕ/г	Микромицеты, КОЕ/г	Актиномицеты, КОЕ/г	Колиформы	<i>E. coli</i>	Энтерококки	Споры <i>Cl. perfringens</i>
Диапазон численности, кл./г								
1	2,0x10 <sup>5</sup>	3,2x10 <sup>4</sup>	1,2x10 <sup>2</sup>	1,4x10 <sup>4</sup>	≤10	Не обн.	≤10	10–100
2	2,7x10 <sup>4</sup>	–	–	–	≤10	Не обн.	Не обн.	–
3	5,3x10 <sup>5</sup>	1x10	1,0x10 <sup>2</sup>	1,2x10 <sup>4</sup>	≤10	Не обн.	Не обн.	10–100
4	1,3x10 <sup>6</sup>	1,1x10 <sup>5</sup>	2,3x10 <sup>2</sup>	8,2x10 <sup>5</sup>	≤10	Не обн.	Не обн.	100–1000
5	1,5x10 <sup>5</sup>	5,0x10 <sup>3</sup>	1,0x10 <sup>3</sup>	1,0x10 <sup>4</sup>	100–1000	10–100	10–100	10–100
6	1,0x10 <sup>4</sup>	2,0x10 <sup>2</sup>	8,0x10 <sup>2</sup>	2,1x10 <sup>4</sup>	≤10	Не обн.	≤10	10–100
7	5,5x10 <sup>3</sup>	1,0x10	4,0x10 <sup>2</sup>	1,5x10 <sup>4</sup>	10–100	≤10	≤10	10–100
8	9,0x10 <sup>5</sup>	2,3x10 <sup>4</sup>	1,0x10 <sup>3</sup>	2,8x10 <sup>5</sup>	10–100	≤10	≤10	1000–10000
9	5,2x10 <sup>6</sup>	3,0x10 <sup>2</sup>	2,2x10 <sup>2</sup>	2,0x10 <sup>4</sup>	≤10	Не обн.	Не обн.	10–100
10	1,1x10 <sup>5</sup>	5,0x10 <sup>4</sup>	2,0x10 <sup>2</sup>	2,1x10 <sup>2</sup>	≥10000	10–100	10–100	1000–10000
11	1,0x10 <sup>6</sup>	1,0x10 <sup>4</sup>	2,9x10 <sup>3</sup>	1,1x10 <sup>3</sup>	≥10000	100–1000	10–100	100–1000
12	4,8x10 <sup>5</sup>	7,0x10 <sup>3</sup>	1,0x10	1,0x10 <sup>3</sup>	10–100	10–100	≤10	100–1000
13	5,0x10 <sup>5</sup>	6,0x10 <sup>3</sup>	1,0x10 <sup>3</sup>	3,0x10 <sup>4</sup>	100–1000	10–100	10–100	1000–10000
14	1,6x10 <sup>5</sup>	4,0x10 <sup>3</sup>	1,0x10	1,5x10 <sup>4</sup>	1000–10000	100–1000	10–100	100–1000

Примечание. \* – Место отбора проб донных осадков. Не обн. – не обнаружено – означает отсутствие данных: 1. Москва, пруд Путяевский; 2. Московская область, Пяловское водохранилище; 3. Московская область, Жестылевское водохранилище; 4. Московская область, рыбоводный пруд ВНИИПРХ с экстенсивной формой рыбоводства; 5. Губкинский городской округ, пруд Попов Верх; 6. Губкинское водохранилище; 7. Старооскольское водохранилище; 8. Льгов, старица р. Сейм; 9. Река – Москва, Серебряный бор; 10. Река – Яуза, Лосиный остров; 11. Река – Яуза, Москва; 12. Река – Песочная, Железногорск, 13. Река – Чернь, Железногорск; 14. Река – Речица, Железногорск.

В литоральной зоне стоячих мелководных водоемов, в которых свет и растворенный кислород проникают до дна, в толще воды и на поверхности дна в летний период вегетируют фитопланктон, фитобентос и высшая водная растительность. В поверхностном слое донных осадков формируется экранирующая ниша аэробных микроорганизмов, осуществляющих деструкцию аллохтонного и автохтонного органического вещества за счет растворенного в воде кислорода.

Донные отложения рек образуются в результате аллювиального литогенеза, сноса химических элементов в растворенном и взвешенном состоянии с прилегающих территорий, а также в продукционных биологических процессах. Течение воды удерживает в толще мельчайшие минеральные частицы, микроколонии бактерии и водорослей, детрит. Поверхностный слой донных осадков – это одна из нескольких микробиологических ниш рек и других водотоков. Бактериобентос размещается на поверхности и внутри органоминерального комплекса в аэробных, микроаэрофильных и анаэробных условиях.

Строение донных отложений и интенсивность микробиологических процессов

были подробно изучены на примере рыбоводных прудов [5]. В поверхностных слоях донных осадков фиксируется высокая численность сапрофитных бактерий – 5–30 млн кл/г сырого ила. Установлено, что наряду с процессами аэробной деструкции, приводящей к снижению уровня растворенного кислорода в воде, в поверхностном 0–2 см слое ила происходили анаэробные процессы сульфат- и сероредукции (при *Eh* от –10 до +130 мВ), а в слое ила 6–8 см – процессы метаногенеза и ацетогенеза. С 1 м<sup>2</sup> поверхности дна прудов в сутки выделялось от 0,9 до 2,3 л газа, имеющего преимущественно метаново-азотный состав. Пузырьки газа транспортировали со дна в водную толщу микрочастицы ила с ассоциированной микрофлорой.

В экосистеме прудов сестон имел особое значение как экониша, связывающая водную толщу и донные отложения. Основу сестона составляли детрит и минеральные частицы, биомасса живых организмов составляла 6%, в органическом веществе сестона достигая 50%. Численность бактерий в осадке сестона была одного порядка с илами прудов. В течение всего сезона в воде прудов преобладали одиночные бактерии, на частицах детрита они составляли

18–52%, в микроколониях 2–6%. т.е. в агрегированном состоянии в среднем в прудах находилось примерно 35% бактерий от количества одиночных клеток и примерно 26% от общего количества бактерий в воде прудов. Количество микроколоний 4,4–12,2 тыс. шт/мл, количество частиц детрита – от 15,8 до 29,2 тыс. шт/мл, преобладали частицы детрита с числом бактерий более 30 шт./частица. В воде реки Яכותь, вытекающей из Жестылевского водохранилища, число частиц детрита составляло 6 тыс. шт/мл, детритные фракции были в основном мелкие с преобладанием до 30 бактерий на частице. Детритные частицы размером 4–5 мкм составляли 17–32%, 9–10 мкм – 27–44%, 17–20 мкм – 39–48%. Часто встречались частицы размером около 30 мкм.

Исходя из означенных выше особенностей функционирования микробного сообщества донных осадков, можно предположить, что частицы поверхностного слоя осадков могли попадать в водную толщу в результате процессов эрлифта с пузырьками газа, взмучивания потоком воды в реке, а также механическим взмучиванием осадков купающимися людьми. Водные объекты всегда имели внешний источник фекального загрязнения. Однако могли также проходить процессы вторичного загрязнения водной толщи микроорганизмами из донных осадков. Для рек описаны также противоположные случаи обнаружения значительных количеств колиформных бактерий в донных осадках при практическом отсутствии в воде [6].

Микробиологические требования к составу и свойству воды водных объектов устанавливают по численности общих и термотолерантных колиформных бактерий [7]. Сопоставление численности ОКБ в воде исследованных водоемов и численности колиформных бактерий в донных осадках дало следующие результаты.

Чистые водоемы, пригодные для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест: Жестылевское водохранилище, р. Москва в районе Серебряного бора, рыбоводный пруд. Численность ОКБ в воде этих водоемов значительно ниже 500 КОЕ/100 мл воды, численность колиформных бактерий в илах – до 10 КОЕ/г.

Сильно загрязненный водоток, постоянно подпитываемый ливневыми и хозяйственно-бытовыми водами: р. Яуза в черте г. Мытищи и Москва. Численность ОКБ в воде составляла 8000–10000 КОЕ/100 мл, численность колиформных бактерий в илах –  $10^4$  КОЕ/г.

Для оценки эпидемической опасности донных осадков пригодны те же индикаторные бактерии, которые используют для

оценки почв [8]. Однако количественные критерии оценки требуют изучения и дальнейшего уточнения.

Колиформные бактерии в высоких количествах присутствовали в донных осадках водоемов, для которых визуально отмечены источники загрязнения. Пруд Попов Верх отличался тем, что на дальнем его берегу была гусиная ферма. Птицы могли подходить к водоему и плавать на ограниченной территории. Река Яуза в верховье в национальном парке заселена чайками и утками, в черте Москвы – принимает в себя огромное количество ливневых стоков. Малые реки в Курской области также загрязнены стоками из сельских населенных пунктов и г. Железногорска.

Энтерококки и бактерии *E. coli* традиционно являются надежными индикаторами фекального загрязнения и служат критериями для оценки эпидемической опасности почв. Донные осадки водоемов, в которых численность колиформных бактерий превышает 1000 кл/г, а численность *E. coli* и *Enterococcus spp.* – порядка 10–100 кл/г сырого ила, вероятно, следует отнести к категории «загрязненные», в которых при определенных обстоятельствах могут присутствовать патогены. В наших исследованиях патогенные кишечные бактерии в донных осадках не были обнаружены.

Сульфитредуцирующие кластридии, среди которых с большой вероятностью присутствует *Clostridium perfringens*, также позволяют оценить степень загрязненности донных осадков за продолжительный период времени в связи с высокой устойчивостью спор этого анаэробного микроорганизма. Они были выявлены во всех образцах донных осадков в численности от 10 до  $10^4$  кл/г сырого ила. По этому показателю наиболее сильно загрязнены старица на р. Сейм, реки Яуза в Национальном парке и Чернь, что не вполне соотносится с другими данными.

Под экологическим состоянием водоемов обычно подразумевают взаимоотношения организмов друг с другом и со средой их обитания, используя при этом экосистемный принцип. Увеличение доли анаэробной деструкции в общей деструкции органического вещества ведет к ухудшению экологического состояния водоемов [9]. По критериям, предложенным А.Н. Дзюбаном, оценено экологическое состояние водоемов в местах рекреации. К водоемам в состоянии «норма» ( $10^3$ – $10^4$  КОЕ/г сапрофитных бактерий) можно отнести Пяловское, Старооскольское и Губкинское водохранилища. В состоянии «риска» ( $10^4$ – $10^5$  КОЕ/г) – Пу-

тяевский пруд в Москве, Жестылевское водохранилище, старицу на р. Сейм, р. Язу в национальном парке Лосиный Остров, малые реки в районе г. Железнодорожска и Железнодорожского металлургического комбината. К водоемам в «предкризисном» состоянии – рыбоводный пруд ВНИИПРХ с экстенсивной формой рыбоводства, р. Москва и Язуа в черте Москвы.

Для сильно загрязненных водоемов совпадают критерии «опасности» и «кризиса», основанные на численности санитарно значимых и сапрофитных бактерий.

Относительно чистые водоемы, пригодные для купания, могут испытывать антропогенное влияние и находиться в состоянии «риска».

### Заключение

Таким образом, в донных осадках нескольких водоемов в разных регионах изучена численность активно делящихся, растущих на питательных средах микроорганизмов, очевидно, принимающих участие в функционировании водной экосистемы. Полученные данные позволяют дать оценку водоемам с санитарно-микробиологических и экологических позиций, которая не всегда совпадает.

### Список литературы

1. Горленко В.М., Дубинина Г.А., Кузнецов С.И. Экология водных микроорганизмов. М.: «Наука», 1977. 289 с.
2. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: «Наука», 2004. 348 с.
3. Михеев П.В. Санитарно-микробиологическое состояние почв береговой полосы водоемов в местах рекреации // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 12–2. С. 59–64.
4. Михеев В.П., Михеева И.В., Михеев П.В. Некоторые биоэкологические особенности водных объектов с разными формами рыбного хозяйства // Вопросы рыболовства. 2014. Т. 15. № 1. С. 66–83.
5. Михеев П.В., Намсараев Б.Б., Борзенков И.А., Горленко В.М. Метаногенез в рыбоводных прудах и его роль в деструкции органического вещества // Микробиология. 1994. Т. 63. № 1. С. 172–174.
6. Нечаева И.А., Акатова Е.В. Оценка микробного состояния рек Тульской области // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Биология. 2014. Вып. 2. С. 270–281.
7. СанПиН 2.1.5.980-00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. М.: Минздрав России, 2000. 13 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/4177334> (дата обращения: 15.11.2019).
8. СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. М.: Минздрав России, 2003. 15 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/4179179> (дата обращения: 15.11.2019).
9. Дзюбан А.Н. Функционирование микробных сообществ донных отложений водоемов как фактор формирования качества водной среды // Вода: химия и экология. 2013. № 6. С. 57–62.