

**СВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ АДСОРБЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ  
НА МИНЕРАЛЬНОЙ ВЗВЕСИ С РАЗВИТИЕМ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА<sup>1</sup>**

**П.В. Пожиленкова<sup>\*</sup>,  
В.С. Филимонов, А.Д. Апонасенко<sup>\*\*</sup>**

*Работа посвящена изучению влияния минеральной взвеси на развитие природного сообщества бактериопланктона. С помощью дифференциального спектрофотометра измерялись первичные гидрооптические характеристики, исследовались процессы адсорбции растворенного органического вещества (РОВ) на взвешенных неорганических частицах водных экосистем. Также в работе производился учет бактериальных клеток, в том числе и агрегированных на неорганических частицах. Эксперименты проводились на модельных и природных водных экосистемах.*

Бактериопланктон является одним из наиболее существенных компонентов экосистемы водоемов. В результате их деятельности минерализуются органические вещества и одновременно создаются пищевые ресурсы для водных беспозвоночных. Наряду с фотосинтезом водорослей бактериальные процессы играют существенную роль в формировании химического состава воды и донных отложений.

Исследование распределения бактериопланктона, его агрегированности и продукции является важнейшей задачей изучения функционирования водоема в целом.

Для того чтобы установить связь между процессами адсорбции, происходящими на поверхности минеральной взвеси с развитием бактериопланктона, необходимо было прежде всего установить сходство этих процессов в модельных экспериментах и природных водах. Для количественного их описания проводились исследования на водоеме с высоким содержанием взвеси – оз. Ханка.

Исследования оз. Ханка проводили в 1995-1997 гг.: русла впадающих и вытекающих рек, устьевые участки, заливы, прибрежная зона и открытая часть озера.

Озеро Ханка является одним из крупных пресноводных водоемов Северной Евразии (Ладожское, Онежское, Псковско-Чудское, Байкал, Ханка). Хозяйственная деятельность человека на прилегающей к бассейну оз. Ханка территории накладывает определенный отпечаток на функционирование гидробиоценозов. Озеро Ханка и ее бассейн расположены на территории Дальнего Востока, в окружении которого имеются рисовые поля. Известно, что наиболее интенсивно природные воды загрязняются в случае применения в рисоводстве эмульсионных препаратов пестицидов [1]. Кроме того, в состав возвратных вод входят органические и неорганические соединения почв, удобрения, количество которых в дренажных стоках достигает 1000 и более мг/л, что не отвечает требованиям рыбного хозяйства [2].

Происходящие в оз. Ханка процессы круговорота вещества и энергии должны являться следствием качественных и количественных изменений гидробиоценозов озера. Особенности гидрологии озера (мелководность, прогрев всей толщи воды, значительная мутность) [3-5] обуславливают специфические условия развития микрофлоры.

Воздействие любого характера на окружающую среду, а именно водоемы, в определенной степени отражается и в их микробном населении.

В то же время нельзя рассматривать бактериопланктон отдельно от остальных звеньев трофометаболических связей, наиболее важной из которых является минеральная взвесь. Минеральные взвеси – это неотъемлемый компонент природных вод. В зависимости от состава почв в зоне водосбора водоема в воде формируется взвешенное минеральное вещество, определенное по химическому составу и физической структуре. При смешении водных масс неизбежно происходят изменения содержания и состава минеральной взвеси. Химическая и биохимическая трансформация взвеси приводит к ее частичному распаду и поступлению в водную массу содержащихся в ней химических, в том числе и биогенных, элементов. С другой стороны, отдельные частицы взвеси являются адсорбционными центрами, на которых происходит адсорбция органических веществ, постоянно содержащихся в природных водах, и дальнейшая химическая и биохимическая трансформация как самой взвеси, так и адсорбатов [6]. Таким образом, минеральная взвесь представляет постоянную динамичную структуру водных масс, самым тесным образом связанную с экосистемой водоема в целом, и в данном случае с бактериопланктоном.

Работы по изучению роли инертных минеральных взвесей в процессах, протекающих в водоеме, проводятся в настоящее время в нескольких взаимодополняющих друг друга направлениях: изучение адсорбции различных

<sup>1</sup> Работа поддержана грантом 6-го конкурса-экспертизы научных проектов молодых ученых РАН (№217)

\* © П.В. Пожиленкова, Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2003; E-mail: polina@icm.krasn.ru.

\*\* © В.С. Филимонов, А.Д. Апонасенко, Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2003; E-mail: apon@icm.krasn.ru.

органических и неорганических веществ, представляющих как необходимые биогенные элементы, так и вещества, загрязняющие водоемы; оценка влияния минеральных взвесей на развитие водной микрофлоры [7-10].

Задача настоящей работы состояла в изучении влияния биохимически инертной взвеси на функционирование бактериопланктона, определении подходов к оценке общей площади границ взвешенного неорганического вещества и объема зоны воздействия, сформированной этими границами, для поверхностных вод как необходимый шаг для перехода к изучению химических и физических процессов, протекающих на этих границах.

### МЕТОДЫ

Для получения более четких зависимостей во взаимодействии минеральной взвеси и природного сообщества бактерий были проведены модельные эксперименты в лабораторных условиях. В проведенных экспериментах в качестве основного компонента исходной среды использована вода из р. Енисей, отобранная в начале зимнего сезона и характеризующаяся низким содержанием растворенных органических веществ, фитопланктона и бактерий. В 2-литровые колбы, заполненные профильтрованной через бумажный фильтр речной водой, добавлялось одинаковое количество раствора гуминовых кислот, очищенных от нерастворимого осадка и различное количество глины. Колбы размещались в специальном качающемся боксе, обеспечивавшем перемешивание среды, достаточное для устранения оседания взвеси. В боксе поддерживалась температура около 20 °С. Гуминовые кислоты введены в состав среды как необходимый компонент для роста гетеротрофных бактерий. При низком содержании органики в исходной среде рост бактерий мог существенно лимитироваться.

Эксперименты выполнены при постоянной концентрации гуминовых кислот 10 мг/л и различной концентрации минеральной взвеси - 5, 15, 45 и 90 мг/л. В ходе экспериментов оценивалось изменение во времени общей численности бактерий и количества бактерий, агрегированных на частицах минеральной взвеси. Учет бактериальных клеток, в том числе и агрегированных на неорганических частицах, выполнялся с помощью эпифлуоресцентной микроскопии [6].

Для оценки содержания растворенного (РОВ) и адсорбированного (АОВ) на частицах органического вещества использовались оптические методы. С помощью дифференциального спектрофотометра ДСФГ-2 снимались спектры ослабления и поглощения света тестируемых суспензий.

Доля адсорбированного вещества оценивалась по отношению разности показателей поглощения нефилтрованной и фильтрованной пробы к показателю поглощения нефилтрованной пробы, как отношение концентраций адсорбированной органики и общего его содержания.

Параллельно со снятием оптических характеристик производилось измерение интегральной индикатрисы светорассеяния для получения информации о размере частиц в пробах. Согласно методике [11] производился расчет диаметра, площади поверхности, объема и концентрации частиц в пробе, общей площади поверхности и общего объема частиц.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения взаимосвязи между минеральной взвесью и природным водным сообществом, как одного из основных факторов самоочищения водоема в целом, необходимо, прежде всего, рассмотреть причины, вызывавшие столь существенное влияние инертных минеральных частиц на развитие бактериопланктона. Прежде всего это связано с более благоприятными условиями нахождения бактерии на взвеси. Для этого представлялось целесообразным проследить и сравнить характер изменения отношения количества адсорбированного органического вещества к органическому веществу, растворенному в воде, при увеличении площади поверхности взвеси для модельных и природных систем (оз. Ханка) (рис. 1).

Это отношение показывает, во сколько раз масса АОВ больше массы РОВ в единице объема воды, а также демонстрирует динамику процесса перехода органики из растворенного в адсорбированное состояние.

Данные хорошо аппроксимировались степенными зависимостями: для модельных систем -  $y=4.46x^{0.56}$  (коэффициент корреляции -  $r=0.95$ ), для оз. Ханка -  $y=31.3x^{0.59}$  ( $r=0.90$ ). Из данного графика видно, что, во-первых, модельные и природные среды отличаются различным диапазоном значений поверхностей взвеси и, следовательно, различным отношением АОВ к РОВ, но при этом сохраняется характер поведения данной зависимости.

Также нетрудно заметить, что взвесь оз. Ханка характеризуется более высокой адсорбционной способностью относительно взвеси в модельных системах. Скорее всего, это связано с различием компонентного состава органического вещества и разной природой адсорбента.

Численные расчеты показали, что с ростом площади поверхности взвеси, отношение АОВ к РОВ для вод оз. Ханка меняется от 1.7 (при концентрации взвеси 8.8 мг/л) до 23 (при концентрации взвеси 128 мг/л), что свидетельствует о преимущественном нахождении органики в адсорбированном состоянии в природном водоеме.

Из этого следует основная особенность природных дисперсных систем, которую можно определить как присутствие в воде не чистой дисперсной терригенной взвеси, а только органо-минеральных комплексов, включающих весь сложный комплекс органических соединений как аллохтонного, так и автохтонного происхождения.

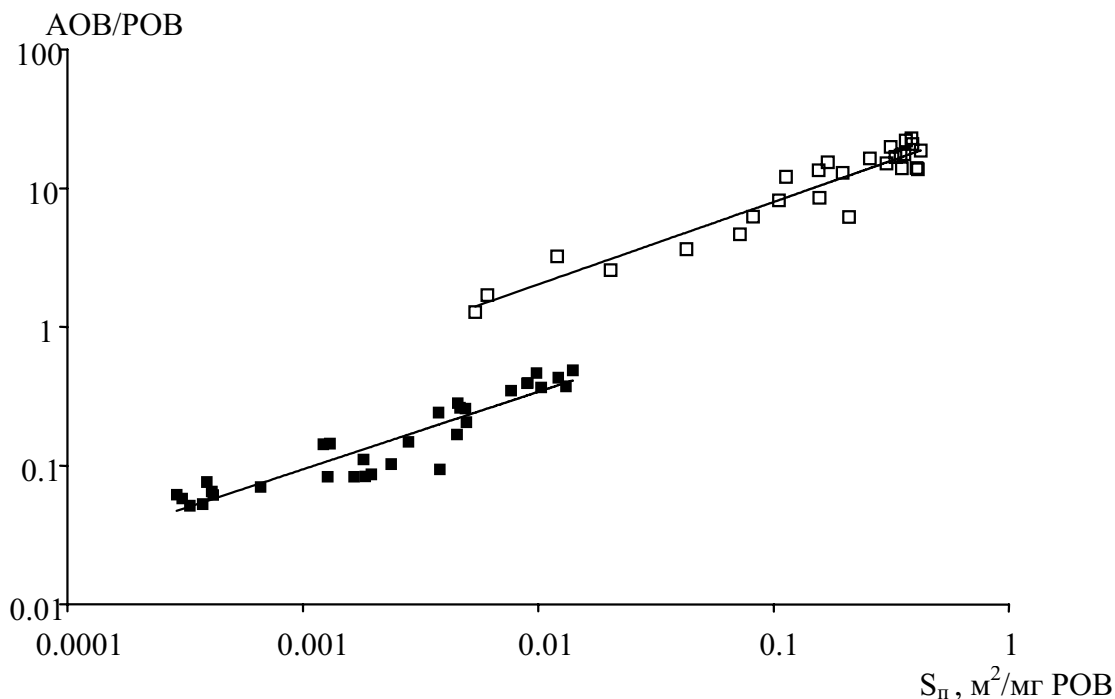


Рис. 1. Зависимость AOB/POB от площади поверхности частиц: ■ - Модельные среды; □ - Ханка

Такие комплексы могут быть благоприятным питательным субстратом для бактерий. Добавка к речной воде биохимически инертных частиц глины привела к существенному увеличению общей численности бактериопланктона по сравнению с контрольным экспериментом с минимальным содержанием минеральной взвеси после фильтрации речной воды. С увеличением концентрации взвеси в проведенных экспериментах наблюдался и рост максимальной численности бактерий (рис. 2).

Наибольшее влияние оказывали добавки небольшого количества взвеси (1-5 мг/л). Дальнейшее повышение концентрации взвеси приводило к некоторому увеличению ее влияния, которое далеко не пропорционально добавке. Полученные данные для модельного эксперимента полностью подтвердили результаты исследований, полученных ранее при добавлении взвеси к воде мезотрофного озера [9]. Однако оставались неясными причины, вызывавшие столь существенное влияние инертных минеральных частиц на развитие бактериопланктона.

Характер изменения скорости размножения бактерий в природном водоеме обусловлен различием условий существования бактерий, а следовательно, наличием в нем внутренних активных границ, связанных с дисперси-

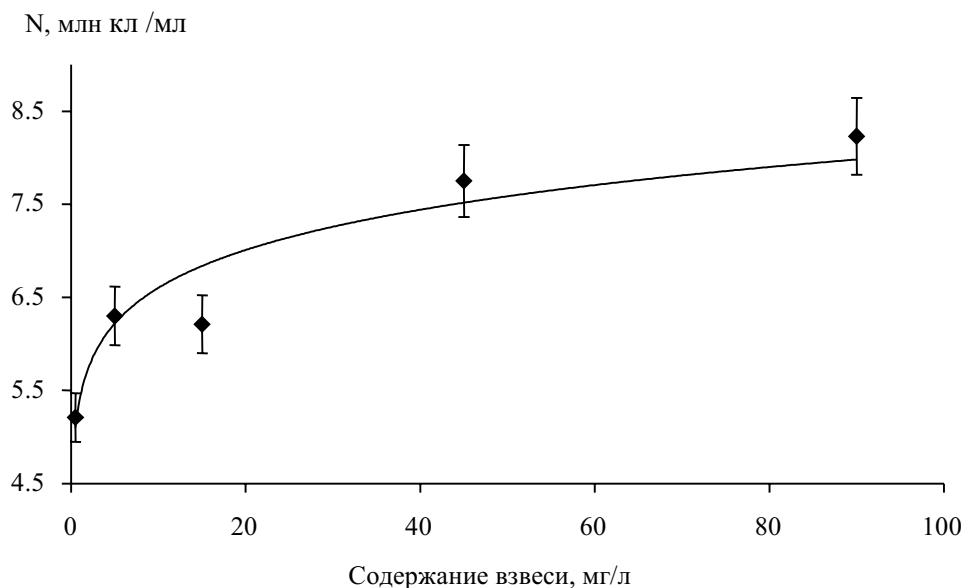


Рис.2. Изменение общей численности бактерий при различном содержании взвеси (модельные эксперименты)

ями. На рис.3 представлен характер изменения скорости размножения бактерий от площади поверхности, приходящейся на одну бактерию для оз. Ханка. Кривая проведена согласно уравнению нелинейной регрессии. Данный график показывает, что граничная поверхность для клетки бактерии стимулирует скорость размножения, хотя данная зависимость имеет явно не линейный характер, а скорее логарифмический. При больших величинах площади поверхности скорость роста бактерий меняется незначительно, что, скорее всего, связано с уменьшением органического субстрата на поверхности взвеси.

Поскольку в представленных модельных экспериментах учитывалась не только общая численность бактериопланктона, но и изменение численности агрегированных клеток, это позволило рассмотреть динамику развития как свободноживущего бактериопланктона, так и бактериопланктона, прикрепленного к минеральным частицам.

Динамика перехода бактерий из свободноживущих в агрегированное состояние в эксперименте с бактериями представлена на рис. 4.

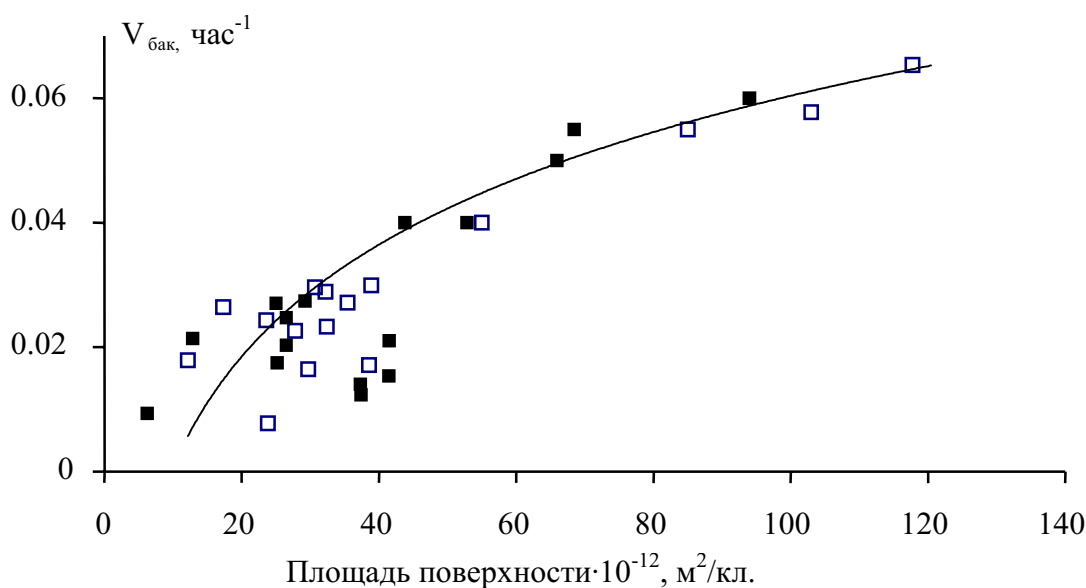


Рис.3. Зависимости скорости размножения бактерий от площади поверхности взвеси, приходящейся на одну бактерию (□ - Ханка, 1997 г.; ■ - Ханка, 1995 г.)

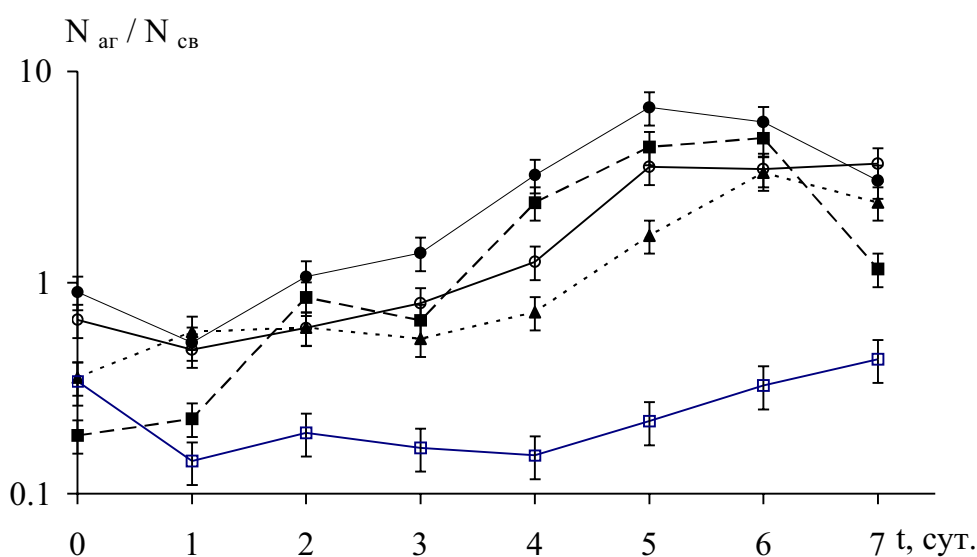


Рис.4. Динамика отношения численностей агрегированных на взвеси и свободноживущих бактерий при различном содержании взвеси: □ - без взвеси; ■ - 5 мг/л; ▲ - 15 мг/л; ● - 45 мг/л; ○ - 90 мг/л

Соотношение агрегированных к свободноживущим бактериям в пробах без взвеси шло значительно ниже всех остальных и практически не изменялось во времени. Все остальные кривые с разным содержанием взвеси имели явные тенденции к росту. Стандартная ошибка не превышала 15 %, причем наибольший рост (по наклону кривой) бактерий наблюдался у пробы с минимальным количеством взвеси. Таким образом, при малом количестве частиц адсорбента создаются наиболее благоприятные условия для развития бактерий, агрегированных на частицах.

Однако при малой численности минеральных частиц общее количество агрегированных на частицах бактерий не может быть значительным. При сохранении общего количества питательных веществ в растворе и увеличении числа введенных минеральных частиц максимальная численность бактерий, в том числе и агрегированных на частицах нарастает. Поскольку с ростом числа минеральных частиц количество адсорбированного на них органического вещества продолжает уменьшаться, то органический субстрат, адсорбированный на частицах, исчерпывается быстрее, чем при меньшем содержании взвеси. Этот процесс приводит к ухудшению условий развития агрегированных на частицах бактерий в динамике. Более четко эти зависимости прослеживаются при рассмотрении динамики соотношения скорости прироста агрегированных и свободноживущих бактерий (рис. 5). Как и на предыдущем графике, видно, что скорость прироста агрегированных бактерий относительно свободноживущих для пробы без взвеси практически не меняется и значительно меньше скорости свободноживущих. Для проб с различным содержанием взвеси наблюдается возрастание скорости прироста агрегированных по сравнению со свободноживущими бактериями, причем выше это соотношение у пробы с минимальным содержанием взвеси.

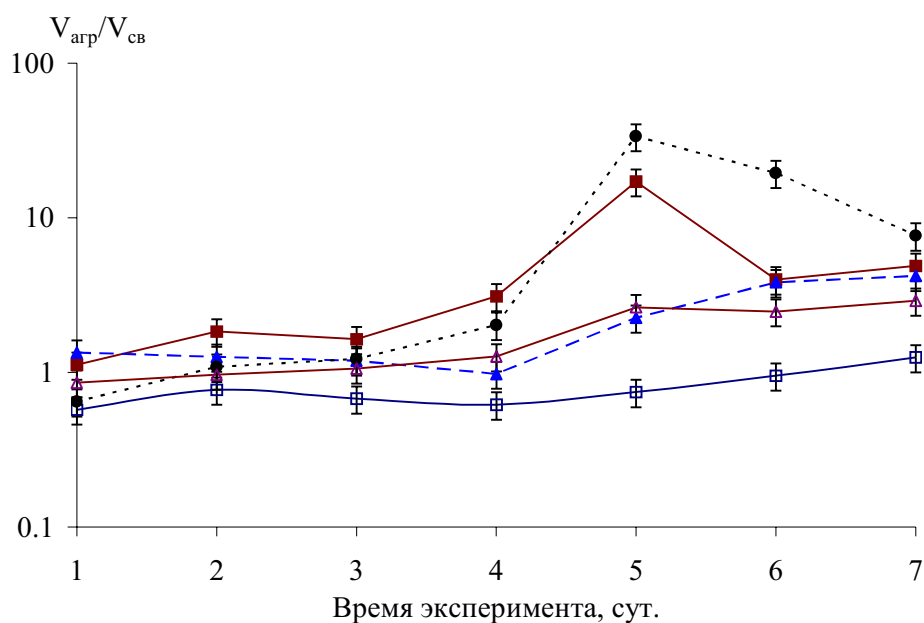


Рис.5. Динамика отношения скоростей прироста агрегированных и свободноживущих бактерий:  
 □ - без взвеси; с добавкой взвеси: ■ - 5 мг/л; ▲ - 15 мг/л; ● - 45 мг/л; △ - 90 мг/л

Из этого следует, что минеральная взвесь оказывает влияние не только на прирост и пространственное расположение бактерий, но и на процессы их метаболизма. Из-за более благоприятных условий, созданных на поверхности минеральной взвеси в процессе адсорбции органических веществ из воды, агрегированные бактерии более активны, что, безусловно, влияет как на процессы самоочищения, так и на функционирование водоема в целом.

Проведенные эксперименты показали, что присутствие инертной минеральной взвеси в системе бактерии - минеральная взвесь - органическое вещество оказывает значительное влияние на рост и пространственное распределение бактерий, а также участвует в перераспределении органического вещества в водоеме. Процессы адсорбции органического вещества на минеральной взвеси приводят к улучшению условий развития агрегированных на взвеси бактерий и замедлению развития свободноживущих бактерий. Поскольку в экспериментах использовалось природное сообщество бактерий, а концентрации органического вещества и минеральной взвеси близки к обычно наблюдаемым в поверхностных водах, можно указать на высокую вероятность появления аналогичных процессов в природных водных экосистемах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Врочинский К.К., Земков Г.В. Гигиенические исследования миграции ялана в природных условиях //Санитария и гигиена. - 1977. - № 1. – С. 99-100.
2. Бесчетнова Э.И. Минерализация воды в дельте Волги и ее изменения в результате антропогенного воздействия //Опыт и проблемы проектирования. Тез. докл. обл. науч-технич. конф. – Астрахань, 1981. – С. 53-55.
3. Кучер А.И. Математическое моделирование рыбопродуктивности водных экосистем на примере озера Ханка: Автореф. дис. ... канд. физ-мат. наук. - Владивосток, 1990. - 25 с.
4. Максимова Э.А., Максимов В.Н. Микробиология вод Байкала. - Иркутск: ИГУ, 1989. – 168 с.
5. Гак Д.З. Бактериопланктон и его роль в биологической продуктивности водохранилищ. - М.: Наука, 1975. - 254 с.
6. Апонасенко А.Д., Лопатин В.Н., Филимонов В.С., Щур Л.А.. Изучение структуры водных экосистем на основе границ раздела фаз взвесь-вода // Сибирский экологический журнал. – 1996. - № 5. - С. 387-396.
7. Хумитаке Секи. Органические вещества в водных экосистемах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. - 199 с.
8. Ch. Rav-Acha, M. Rebhun. // Wat. Res. 1992. Vol. 26, No. 12, p.1645.
9. R.Z. Maigetter, R.M. Pfister. // Can. J. Microbiol. 1975. Vol. 21, p.173.
10. Остапеня А.П. Сестон и детрит как структурные и функциональные компоненты водных экосистем. Дис. ... д-ра биол. наук. – Минск, 1988. – 530 с.
11. Лопатин В.Н., Апонасенко А.Д., Щур Л.А., Филимонов В.С. Оптический способ определения размера частиц в суспензии. Пат. РФ № 2098794. -Бюл. изобр. -1997. -№ 34. -С.16.

**CONNECTION OF THE PROCESSYS OF THE ADSORPTION OF  
ORGANIC MATTER ON THE MINERAL PARTICLES AND DEVELOPMENT OF BACTERIOPLANKTON**

**P.V. Pozhilenkova, V.S. Filimonov, A.D.Aponasenko**

*The work is devoted to study of influence of a mineral suspension on development of natural community of bacterioplankton. In the frame of this work are estimated of the primary hydrooptical characteristics, the processes of an adsorption of the dissolved organic matter (DOM) on suspended inorganic particles were investigated. Also the number of the account bacteria was made, including aggregated on inorganic particles. Experiments were conducted on model and natural water.*