

**П.В. Постникова, В.С. Филимонов, А.Д. Апонасенко,
В.Н. Лопатин, Л.А. Щур**

Дисперсная пространственная структура экосистемы лессового озера Ханка

Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск

Поступила в редакцию 12.11.2004 г.

Рассмотрены возможности использования оптических методов для оценки параметров дисперсной и пространственной структуры водных экосистем лессовых водоемов на примере оз. Ханка. Показано, что экспрессные оптические методы позволяют оценивать средний размер органоминеральных хорионов, их граничную поверхность, концентрацию частиц минеральной взвеси, среднюю величину расстояния между частицами, общее содержание растворенного органического вещества. Используемые методы инструментальной оценки характеристик границ контакта позволяют перейти собственно к количественным характеристикам при изучении процессов, протекающих в пограничных зонах. Оценка численности бактерио- и фитопланктона, выполненная с помощью стандартных гидробиологических методов, позволила оценить структуру их пространственного распределения в водах озера. Данные о пространственном распределении бактериопланктона, фитопланктона и частиц минеральной взвеси дают возможность более точно определить энергию, затрачиваемую бактериальными клетками при их переходе из свободного в прикрепленное состояние и клетками фитопланктона при их вертикальной миграции.

В последние годы в исследовании водных экосистем активно разрабатывается структурно-функциональный подход, связывающий интегральные потоки вещества и энергии с дисперсными компонентами экосистем [1–5]. Дисперсные компоненты имеют громадные поверхности раздела «взвесь–вода» и формируют особую структуру пограничных слоев, зон активной трансформации вещества и энергии [6, 7]. Количественные выражения активизации биогеохимических процессов в пограничных зонах, недоступных для прямого наблюдения, невозможны без знания величин площади границы и объема зоны влияния, сформированной этой границей. Прежде всего, это относится к хориону отдельной частицы (частица + пограничная зона). Известно, что первичная продукция водных экосистем тесно коррелирует с содержанием детрита.

Открытие механизма превращения растворенного органического вещества (РОВ) в трофически ценное взвешенное вещество [8, 9] привело к пересмотру сложившихся представлений о закономерностях функционирования водных экосистем. Пути трансформации РОВ во взвесь разнообразны и могут осуществляться как за счет микробиальной активности, так и абиотическими механизмами, когда ведущую роль играют физико-химические процессы. За счет адсорбции РОВ на граничных поверхностях взвешенных минеральных частиц и образования органоминерального детрита (ОМД) значительные запасы вещества и энергии, аккумулярованные в нем, становятся доступными для водных организмов и могут рассматриваться как дополни-

тельное звено в системе трофических связей пищевой цепи [5].

В экологической гидробиологии все большее распространение получают биофизические методы исследования на основе изучения оптических, люминесцентных и флуоресцентных полей. Изучение физических процессов, являющихся отражением взаимодействия организмов между собой и окружающей их средой, позволяет оценивать многие параметры водных экосистем. Это и послужило основанием для оценки возможности использования оптических методов для получения характеристик дисперсной структуры взвеси, их сопоставления с некоторыми характеристиками дисперсной структуры фитопланктона и бактериопланктона, оценки пространственной структуры этих звеньев экосистемы в водоеме лессового типа. В таких водоемах, характеризующихся высоким содержанием минеральной взвеси, эти процессы должны быть выражены наиболее ярко, а их наблюдение существенно упрощается.

Объект и методы исследования

Объектом исследования было оз. Ханка – крупнейшее озеро на Дальнем Востоке. Его площадь составляет 4070 км², наибольшая глубина – 6,5 м. Оно является типичным представителем лессовых систем, особенность которых заключается в том, что их экосистемы функционируют в условиях наличия в воде огромного количества мелкодисперсных терригенных частиц, сильно рассеи-

вающих свет. При этом они остаются высокопродуктивными, выдерживая значительные антропогенные нагрузки.

Для характеристики дисперсной структуры пробы отбирались на 150 станциях по всему озеру в течение 4 сезонов в 1992 г. и в 1995–1997 гг. — на нескольких прибрежных и озерных станциях для исследования процессов адсорбции на минеральной взвеси. Оценка содержания взвешенных минеральных частиц, их эффективных средних размеров и определение поверхности раздела «взвешенные частицы — вода», а также содержания РОВ проводились по первичным гидрооптическим характеристикам (спектральные показатели поглощения, ослабления, рассеяния света для области спектра 400–800 нм) и интегральным индикатрисам светорассеяния по методикам [10]. Доля адсорбированного органического вещества (АОВ) по отношению разности показателей поглощения нефилтрованной и фильтрованной проб к показателю поглощения нефилтрованной пробы оценивалась как отношение концентрации АОВ к общей концентрации адсорбированного на частицах и растворенного в воде органического вещества (АОВ + РОВ). Чисто растворенным органическим веществом считалось то, которое проходит через фильтр с порами 0,17 мкм, поскольку та часть АОВ, которая адсорбируется на более мелких частицах, составляла не более 2–5%.

Отбор проб фитопланктона проводили в поверхностном слое батометрическим методом, концентрирование проб — фильтрационным методом. Для подсчета численности водорослей использовали счетную камеру объемом 36,5 мм³. Биомассу и граничную поверхность рассчитывали по среднему объему, приравнивая форму клеток к близкому геометрическому телу. Учет бактериальных клеток, в том числе прикрепленных к детриту и неорганическим частицам, проводился с помощью эпифлуоресцентной микроскопии. В качестве флуорохрома использовался флуорескамин. Бактерии осаждали на полядерные фильтры с диаметром пор 0,17 мкм. Собственную флуоресценцию фильтров устраняли обработкой их суданом черным-В [11].

Результаты и обсуждение

Одна из задач настоящей работы заключалась в исследовании ОМД и в первую очередь запасов ОВ, аккумулированных минеральными частицами из растворенной фазы во взвесь, его объемной концентрации, толщины и объема адсорбированного слоя. Были получены изотермы адсорбции для вод оз. Ханка (рис. 1). Для учета различной степени дисперсности в исследуемых пробах концентрация адсорбированного и растворенного ОВ рассчитывалась не на единицу массы адсорбента, а на единицу его поверхности.

Полученные изотермы адсорбции аппроксимировались по модели Ленгмюра, характерной для адсорбции из водных растворов:

$$q = kC_p / (1 + kC_p), C_a = C_{a \text{ макс}} q,$$

где C_a и C_p — концентрации адсорбированного и растворенного ОВ на единицу поверхности ОМД соответственно; $C_{a \text{ макс}}$ — максимально возможная концентрация АОВ; k — константа адсорбционного взаимодействия; q — степень покрытия поверхности частиц (доля занятых адсорбционных центров).

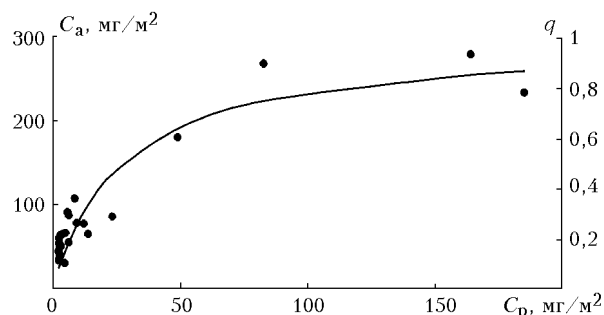


Рис. 1. Изотерма адсорбции РОВ на минеральной взвеси для вод оз. Ханка

Параметры модели Ленгмюра: множественный коэффициент корреляции — 0,95; относительная приведенная погрешность — 18%; число наблюдений — 27; максимально возможная концентрация АОВ — (310 ± 25) мг/м², константа адсорбционного взаимодействия — 0,035 м²/мг.

В ранее проведенных модельных экспериментах [12] выявлена зависимость толщины адсорбированного слоя от поверхностной концентрации АОВ. Поскольку характер зависимостей отношений C_a/C_p от концентрации РОВ (рис. 2) и концентраций C_a от величины площади поверхности взвеси (рис. 3) одинаков и для вод озера, можно с учетом константы адсорбционного равновесия найти для них толщины адсорбированного слоя ОМД.

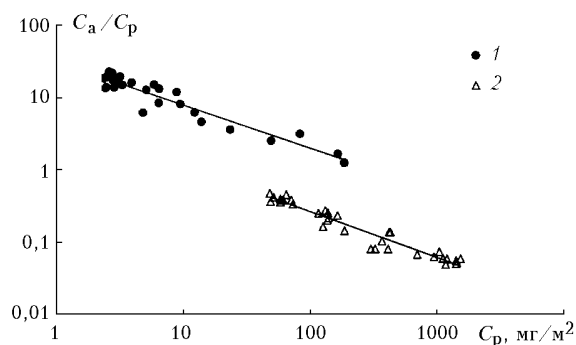


Рис. 2. Зависимость содержания АОВ на единицу поверхности от величины поверхности взвеси на единицу массы РОВ: 1 — оз. Ханка; 2 — модельные эксперименты

Толщины адсорбированного слоя для озера Ханка в основном изменялись от 0,18 до 0,50 мкм. Максимальная толщина (при $C_{a \text{ макс}}$) составила 0,60 мкм. Объем адсорбированного слоя составляет от 0,3 до 0,8 объема хориона в зависимости от соотношения концентраций органического вещества и взвеси. Расчеты объемной плотности адсорбированного органического вещества (g) показали, что она линейно зависит от C_a . В водах оз. Ханка g

варьировало от 150 до 400 кг/м³. Таким образом, минеральная взвесь концентрирует растворенное органическое вещество в десятки и сотни тысяч раз.

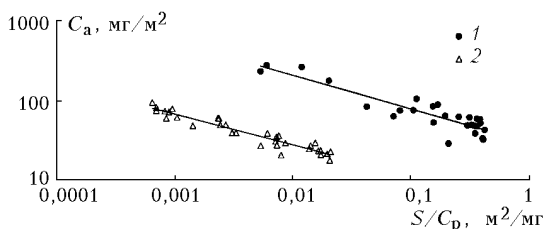


Рис. 3. Зависимости отношения АОВ к РОВ от концентрации РОВ на единицу площади поверхности частиц. Обозначения см. рис. 2

Графики показывают, 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, но при этом сохраняется характер поведения данной зависимости.

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 ОВ 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 преимущественно органоминеральных комплексов, включающих органические соединения как аллохтонного, так и автохтонного происхождения.

Следовательно, при использовании предложенных оптических методов изучения структуры водных экосистем на основе границ раздела фаз «взвесь—вода», при оценке размеров частиц и их граничных поверхностей следует учитывать и оценку количества растворенного органического вещества. В районах, где содержание органического вещества незначительно и, следовательно, меньшее его количество адсорбировано на частицах взвеси, оценки размеров будут ближе к истинным размерам адсорбента, а в богатых органическим веществом районах оптические данные будут характеризовать размеры хорионов. Эти результаты указывают на необходимость более детального исследования дисперсной структуры минеральной взвеси в поверхностных водах для того, чтобы установить их роль в функционировании экосистемы конкретного водоема. Такие исследования дисперсной структуры минеральной взвеси были проведены на оз. Ханка.

В зимний период распределение взвешенного вещества в озере довольно однородно. Повышенная концентрация наблюдается на участках озера, прилегающих к устьям рек, несущих в этот период большее, чем в озере, количество взвеси. В весенний период количество минеральных взвешенных частиц в водах озера резко возрастает до 154 мг/л,

а зоны с пониженной концентрацией взвеси прилегают к устьям отдельных рек. Высокие концентрации взвеси (45–85 мг/л) наблюдаются по всей центральной части озера. Летом и осенью распределение взвеси по акватории озера становится более равномерным. На значительной территории центральной части озера концентрация взвеси остается высокой — от 65 до 85 мг/л.

Были выполнены и оценки средних эффективных размеров взвешенных частиц. В различные сезоны года средний размер частиц в озере варьирует от 0,17 до 1,59 мкм. Наблюдаются значительные изменения размерных характеристик частиц по сезонам года. В зимний период средний размер частиц составляет $(0,66 \pm 0,16)$ мкм, весной $(1,24 \pm 0,13)$ мкм, летом $(1,15 \pm 0,17)$ мкм и осенью $(1,07 \pm 0,17)$ мкм. Как и следовало ожидать в зимнее время, при уменьшении перемешивания, средний размер частиц существенно ниже, чем в периоды открытой воды. В то же время установлено, что среднее количество частиц в озере в различные сезоны изменяется в пределах от $24 \cdot 10^9$ до $49 \cdot 10^9$ част./л, а граничная поверхность от 30 до $130 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Полученные данные о концентрации взвеси и средних размерах частиц позволили оценить концентрацию частиц, общую величину граничной поверхности на единицу объема, отношение поверхности к объему и расстояние между частицами. Более детально все эти характеристики приведены в таблице. В то же время при высокой численности фито- и бактериопланктона эти компоненты sestона могут оказывать влияние на оценку численности и определяемые размерные характеристики минеральной взвеси в поверхностных водах. Для этого были выполнены оценки численности этих компонентов по акватории озера.

Наиболее интенсивное развитие фитопланктона наблюдалось в весенний период. При этом общая численность фитопланктона изменялась от 1,5 до 35 млн кл./м³ при среднем значении 8,6 млн кл./м³. В летний период численность фитопланктона оставалась достаточно высокой, но немного ниже, чем в весенний период. В осенних пробах средняя по озеру численность упала до 3,1 млн кл./м³, а в зимний период до 2,7 млн кл./м³. При этом средний размер граничной поверхности клеток фитопланктона в весеннем сезоне при максимальном его развитии составил $0,91 \text{ м}^2/\text{м}^3$, при изменениях на отдельных станциях — от 0,07 до $5,7 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Таким образом, даже при минимальной зарегистрированной концентрации взвешенных минеральных частиц в озере, составлявшей $2 \cdot 10^9$ част./л, фитопланктон не может вносить сколько-нибудь существенный вклад в оценку концентрации частиц и их граничной поверхности в лессовом водоеме.

Количество бактерий в бассейне озера в зимний период изменялось в пределах 0,5–4,2 млн кл./мл при среднем значении 1,3 млн кл./мл. Пределы изменения количества клеток бактериопланктона по акватории озера весной при среднем значении численности 1,7 млн кл./мл были меньше, чем зимой.

Характеристики взвешенного вещества, РОВ, бактерио- и фитопланктона оз. Ханка

Месяц	Величина	Содержание РОВ, мг/л	Содержание взвешенного вещества, мг/л	Средний диаметр частиц, мкм	Расстояние между частицами, мкм	Количество частиц в ед. объема · 10 ⁹ , част./л	Площадь граничной поверхности взвеси в ед. объема, м ² /л	Количество бактерий в ед. объема · 10 ⁹ , кл./л	Расстояние между бактериями, мкм	Численность фитопланктона в ед. объема · 10 ³ , кл./л	Расстояние между клетками фитопланктона, мм
Февраль—март	средн.	5,9	7,5	0,72	41	49	0,03	1,3	91	2,7	7,1
	мин.	1,8	2,3	0,17	9	2	0,01	0,5	126	—	—
	макс.	21,2	31,3	1,51	81	1100	0,11	4,2	62	—	—
Май	средн.	7,2	62,5	1,24	35	24	0,12	1,7	84	8,6	4,9
	мин.	2,5	12,8	0,91	25	4	0,03	0,5	126	1,5	8,7
	макс.	13,2	154,0	1,56	63	53	0,27	9,0	48	35,0	3,1
Июль	средн.	4,4	64,0	1,15	31	34	0,13	1,5	87	—	—
	мин.	1,8	20,2	0,83	22	7	0,04	0,5	126	—	—
	макс.	18,5	130,6	1,57	52	80	0,25	3,3	67	—	—
Октябрь	средн.	3,9	50,8	1,06	32	35	0,12	1,4	89	3,1	6,9
	мин.	2,5	8,9	0,69	21	4	0,02	0,8	108	—	—
	макс.	8,3	128,4	1,51	64	96	0,23	2,2	77	—	—

Среднее количество бактерий в летний период составляло 1,5, а осенью — 1,4 млн. кл./мл. Для весеннего сезона, характеризующегося наибольшей средней численностью бактерий, средняя площадь граничной поверхности клеток составила 3,3 м²/м³ при изменении по акватории озера от 1,0 до 5,8 м²/м³.

Сопоставляя эти результаты, можно констатировать, что в лессовых водоемах средняя по акватории концентрация взвешенных неорганических частиц более чем на порядок превышает концентрацию бактериопланктона. Следовательно, можно утверждать, что в лессовом водоеме ни фито-, ни бактериопланктон не оказывают какого-либо существенного влияния на изменение показателя рассеяния. Полученные же с помощью оптических методов оценки размеров частиц сестона представляют собственно оценку среднего размера частиц органоминеральной взвеси.

Выполненные оценки средних размеров частиц и концентраций минеральной взвеси, фито- и бактериопланктона позволили перейти к рассмотрению параметров пространственной организации водной экосистемы озера. Среднее расстояние между минеральными частицами в различные сезоны года изменяется от 31 до 41 мкм, средняя по озеру граничная поверхность взвеси — от 30 до 130 м²/м³. Среднее расстояние между бактериальными клетками в различные сезоны года изменяется от 84 до 91 мкм, а между клетками фитопланктона от 4,9 до 7,1 мм. Эти данные позволяют представить объемную структуру расположения этих компонентов. Используя в качестве параметра интегральные площади граничных поверхностей компонентов экосистем, их дисперсную структуру можно пред-

ставить в виде обобщенных структурных формул. Такие формулы можно составлять для различных районов водоема, усредненные для всего водного объекта, средние для сезона исследования. Усредненные формулы дисперсной структуры озера Ханка (летний сезон) для ряда фитопланктон — бактерии — детрит — органоминеральный детрит представляются в виде 1 : 3 : 6 : 140.

Полученные высокие значения граничной поверхности взвеси для лессового водоема указывают на необходимость внимательного подхода и оценки значимости ОМД в функционировании водоема за счет физико-химических и биологических процессов, протекающих в пограничных слоях, при оценке биопродуктивности, биотического круговорота и формирования качества воды.

Заключение

Использованные экспрессные оптические методы позволили выявить структуру и изучить параметры органоминерального детрита (оценить средние размеры органоминеральных хорионов, их граничную поверхность, концентрацию частиц, расстояние между частицами) для лессового водоема. Выполнена оценка численности клеток фито- и бактериопланктона. Оценены величины расстояний между клетками. Эти данные позволяют представить пространственную структуру этих компонентов биоценоза, оценить общее количество РОВ, доступное каждой клетке, и затраты энергии, необходимые клетке для ее потребления.

Выявлено, что в лессовом водоеме подавляющая доля растворенных органических веществ не

свободно распределена в водной среде, а находится в адсорбированном состоянии на взвешенных в воде минеральных частицах. При этом граница дисперсной фазы составляет от десятков до сотен квадратных метров на кубометр воды озера, что указывает на необходимость учета и особую значимость процессов в адсорбционных слоях для лессовых экосистем.

Показана возможность решения ряда задач, связанных с фундаментальной научной проблемой выявления и изучения пространственной структуры водных экосистем на основе единого системного принципа — границ раздела (контакта), что позволяет перейти собственно к изучению процессов, протекающих в пограничных зонах на хорионах частиц в водоемах.

1. Хайлов К.М. Экологический метаболизм в море. Киев: Наук. думка, 1971. 252 с.
2. Алимов А.Ф. Структурно-функциональный подход к изучению сообществ водных животных // Экология. 1982. № 3. С. 45–51.
3. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.
4. Гутельмахер Б.Л. Метаболизм планктона как единого целого: Трофометаболические взаимодействия зоо- и фитопланктона. Л.: Наука, 1986. 156 с.

5. Остапеня А.П. Сестон и детрит как структурные и функциональные компоненты водных экосистем: Дис. ... док. биол. наук. Минск, 1988. 530 с.
6. Айзатуллин Т.А., Лебедев В.Л., Хайлов К.М. Океан. Фронты, дисперсии, жизнь. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 192 с.
7. Лебедев В.Л. Граничные поверхности в океане. М.: МГУ, 1986. 150 с.
8. Baylor E.R., Sutcliffe W.H. Dissolved organic matter in sea water as a source of particulate food // *Limnol. and Oceanogr.* 1963. V. 8. N 4. P. 369–371.
9. Riley G.A. Organic aggregates in sea water the dynamics of their formation and utilization // *Limnol. and Oceanogr.* 1963. V. 8. N 1. P. 372–386.
10. Апонасенко А.Д., Лопатин В.Н., Филимонов В.С., Щур Л.А. Некоторые возможности контактных оптических методов для исследования водных экосистем // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1998. Т. 34. № 5. С. 721–726.
11. Поглазова М.Н., Мицкевич И.Н. Применение флуорескамина для определения количества микроорганизмов в морской воде эпифлуоресцентным методом // *Микробиол.* 1984. Т. 53. Вып. 5. С. 850–858.
12. Pozhilenkova P.V., Aponasenko A.D., Filimonov V.S. Investigation of formation and structural characteristics of the adsorbed layer of organic matter on suspended mineral particles after the examples of humate Na adsorption processes on clay minerals // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5397. P. 102–108.

P.V. Postnikova, V.S. Filimonov, A.D. Aponasenko, V.N. Lopatin, L.A. Shchur. The disperse spatial structure of the Khanka loess lake ecosystem.

The possibilities to use optical methods for estimating the parameters of the disperse and spatial structure of water ecosystem of loess water bodies are considered using the Lake Khanka as an example. It was shown that proximate optical methods could be used to estimate the average size of organo-mineral chorions, their boundary surface, the concentration of mineral suspended particles and their specific surface, the average distance between particles, and the total concentration of organic matter. The methods of instrumental valuation of contact boundary characteristics, which were used, allow proceeding to direct investigation of quantitative characteristics when studying the processes in boundary zones. The evaluation of the number of bacterio- and phytoplankton, carried out with the help of standard hydrobiological methods, has allowed estimating the structure of their spatial distribution in lake water. The data on the spatial distribution of bacterioplankton, phytoplankton and mineral suspended particles enable to determine more accurately the energy expended by bacteriocytes at their transition from the free to the attached state and by phytoplankton cells at their vertical migration.