

УДК 574.5: 574.34.045 + 551.521

**Ретроспективный анализ влияния фотосинтетически активной
радиации на весеннее «цветение» фитопланктона в водохранилище
питьевого назначения**

Юсупова К.О., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,
кафедра «Прикладная математика»*

Научный руководитель: Корсак М.Н., к.б.н.,

*доцент каф. «Экология и промышленная безопасность»
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана*

e9@mx.bmstu.ru

По результатам многочисленных исследований пресноводных водоемов, выполненных различными авторами, установлено, что самое активное изменение численности фитопланктона происходит в весенний период, вскоре после таяния льда. В этот период наблюдается интенсивное развитие микроводорослей – «цветение воды», сопровождающееся изменением цвета, вкуса и запаха воды в водоеме.

Объектом исследования было выбрано Учинское водохранилище – водоем питьевого назначения, имеющий незначительную собственную площадь водосбора и питаемый водой канала им. Москвы. Имеет две станции: Пестово (верховье водохранилища) и Листвянка (нижняя часть водохранилища). Данное водохранилище имеет ширину от 0.1 до 3 км, протяженность около 12 км, глубину до 21.5 м (средняя — 7.5 м). Полезный объем водохранилища около 50 млн м³, полный — 146 млн м³, площадь — 19.3 км². Регулирование стока сезонное, колебания уровня до 2 метров. Замерзает в конце ноября, вскрывается в середине апреля.

Наиболее значимую роль в сезонной сукцессии фитопланктона Учинского водохранилища в весенний период играют диатомовые водоросли, а в летний период – синезеленые. В течение вегетационного периода происходит смена доминирующих групп фитопланктона. Весной (май-июнь) и осенью (конец сентября-октябрь) в фитоценозе преобладают диатомовые водоросли (pp. *Stephanodiscus*, *Asterionella*, *Melosira*), в летний период – синезеленые (pp. *Microcystis*, *Anabaena*).

Весенние пики цветения микроводорослей чаще всего были приурочены к первой декаде мая и были вызваны массовым развитием диатомовых водорослей

(*p.Stephanodiscus*, *Asterionella*, *Melosira*), составлявших до 90% общей численности фитопланктона (рис. 1). В период «биологического лета» - в конце июня–начале июля 1999-2003 гг. численность диатомовых существенно снижалась, хотя их доля в общей численности фитопланктона периодически достигала 47-75%. С конца сентября до конца октября фитопланктонное сообщество характеризовалось невысокими значениями общей численности при доминировании диатомовых (60–85%).

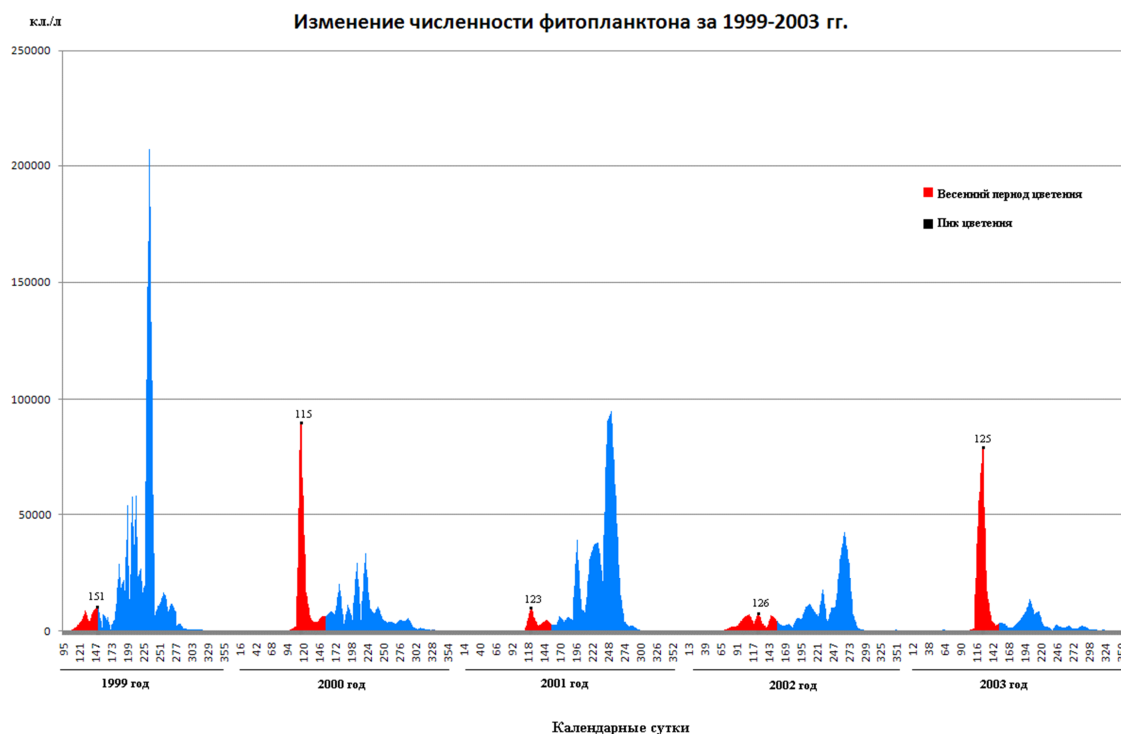


Рис.1. Изменение численности фитопланктона в Учинском водохранилище в 1999-2003 гг.

В Учинском водохранилище, в 1999-2003 годы после весеннего пика фитопланктона (11000-90000 кл/л), вызванного интенсивным развитием диатомовых (*pp. Stephanodiscus*, *Asterionella*, *Melosira*) суммарная численность водорослей в первой половине лета находилась на уровне 13 000 кл/л. В период летнего цветения синезеленых (*pp. Microcystis*, *Anabaena*) в середине июля общая численность водорослей достигала значений 57 000 кл/л. В сентябре численность фитопланктона снижалась до уровня 10 000 кл/л. К концу вегетационного сезона (в конце октября-начале ноября) происходило значительное уменьшение обилия фитопланктона, что связано, по-видимому, с уменьшением продолжительности светового дня. Сезонная динамика фитопланктона в рассматриваемые годы отличалась значительными межгодовыми вариациями. Наиболее выраженным был весенний пик численности водорослей в 2000 и 2003 гг. обусловленный

«цветением» диатомовых в середине мая, после которого происходило достаточно быстрое снижение количества водорослей в воде (рис.1). В июне-июле их численность находилась на уровне 3000 кл/л. «Биологической осенью» с середины сентября до конца вегетационного периода численность водорослей снижалась до 1500 кл/л.

Ранее было установлено, что именно световой фактор (уровень солнечной радиации, попадающей в толщу водоема) является ключевым моментом начала весеннего развития фитопланктона. Это обусловлено важностью солнечной радиации как единственного источника энергии для фотосинтеза – процесса создания органического вещества, осуществляемого фитопланктоном в водоемах. Эту гипотезу можно проверить путем нахождения корреляционной зависимости между суммарной солнечной радиацией и датой пика «цветения» микроводорослей, используя значения этих параметров за период 1998-2003 гг. для двух районов рассматриваемого водохранилища (табл.1).

Таблица 1

Отдельные параметры весеннего цветения фитопланктона Учинского водохранилища (ст. Пестово и Листвянка) в 1998-2003 гг., используемые для корреляционного анализа: $x_{\max}$ – дата весеннего пика «цветения» фитопланктона (календарные сутки с 1 января текущего года), $A_{\max}$ – максимальная численность весеннего фитопланктона (тыс. кл/л), y – суммарная величина солнечной радиации за период 35-40 календарных суток для ст. Пестово и 44-49 календарных суток для ст. Листвянка (МДж/м²)

Год	Ст. Пестово				
	^(p) $x_{\max}$	y	$x \times y$	x^2	y^2
1998	131	6.480	848.88	17161	41.99
1999	131	8.230	1078.13	17161	67.73
2000	114	5.140	585.96	12996	26.42
2001	122	6.470	789.34	14884	41.86
2002	111	6.240	692.64	12321	38.94
2003	124	7.300	905.20	15376	53.29
Σ	733	39.86	4900.15	89899	270.23
	$\bar{x} = 122.18$	$\bar{y} = 6.64$			
Год	Ст. Листвянка				
	^(l) $x_{\max}$	y	$x \times y$	x^2	y^2
1998	131	9.570	1253.67	17161	91.58
1999	124	9.500	1178.00	15376	90.25

2000	123	7.660	942.18	15129	58.68
2001	122	7.340	895.48	14884	53.88
2002	98	5.300	519.4	9604	28.09
2003	131	6.800	890.8	17161	46.24
Σ	729	46.17	5679.53	89315	368.72
	$\bar{x}=121.50$	$\bar{y}=7.70$			

Для определения вида связи между рассматриваемыми параметрами: датой пика цветения фитопланктона и суммарной солнечной радиацией, используя массив данных из таблицы 1, был вычислен коэффициент корреляции r для каждого из районов водоема. Важно помнить, что коэффициент r используется при наличии линейной связи между признаками. Если $r = 0$, то прямолинейная зависимость отсутствует. Напомним, что если связь между признаками обратная, то r имеет отрицательный знак и наоборот. При r , близком к ± 1 , связь между признаками высокая, при $r \approx 0.4 \sim 0.5$ связь слабая, при $r \leq \pm 0.3$ – весьма слабая. Для расчета коэффициента r используют наиболее распространенное соотношение:

$$r = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x-\bar{x})^2 \Sigma(y-\bar{y})^2}}. \quad (1)$$

Из (1) выведена более удобная формула для коэффициента корреляции:

$$r = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x-\bar{x})^2 \Sigma(y-\bar{y})^2}} = \sqrt{B_{x/y} \cdot B_{y/x}} = \frac{\Sigma xy - \frac{\Sigma x \Sigma y}{n}}{\sqrt{\left(\Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n}\right) \left(\Sigma y^2 - \frac{(\Sigma y)^2}{n}\right)}}. \quad (2)$$

По формуле (2) вычислены коэффициенты корреляции для ст. Пестово и ст. Листвянка:

$$\begin{aligned} (p)r &= \frac{4900.15 - \frac{733 \times 39.86}{6}}{\sqrt{\left(89899 - \frac{733^2}{6}\right) \left(270.23 - \frac{39.86^2}{6}\right)}} \approx 0.7 \\ (l)r &= \frac{5679.53 - \frac{729 \times 46.17}{6}}{\sqrt{\left(89315 - \frac{729^2}{6}\right) \left(368.72 - \frac{46.17^2}{6}\right)}} \approx 0.7. \end{aligned}$$

В результате рассчитанные коэффициенты корреляции для двух районов Учинского водохранилища составили: $r > 0.6$. Данный факт является показателем того, что между суммой фотосинтетически активной радиации (ФАР) за период с 35 по 40 календарные сутки с начала года на ст. Пестово и за период с 44 по 49 календарные сутки на ст. Листвянка и датами пика «цветения» фитопланктона на обеих станциях присутствует сильная линейная связь. Обнаруженная положительная корреляционная связь между рассматриваемыми параметрами (датой весеннего пика цветения

фитопланктона и пентадной суммой ФАР) означает, что более высокий уровень значений ФАР в данный период сдвигает момент наступления весеннего цветения на более поздний срок. Это обстоятельство свидетельствует о том, что суммарная солнечная радиация в феврале, когда водоем еще покрыт льдом (35-49 календарные сутки), задерживает последующее весеннее развитие фитопланктона.

Построим на основе имеющихся данных гистограммы для Учинского водохранилища, которые наглядно продемонстрируют процессы цветения фитопланктона, например, в течение 2000 г. (рис. 2, 3).



Рис. 2. Гистограмма изменения численности фитопланктона в Учинском водохранилище за 2000 г.

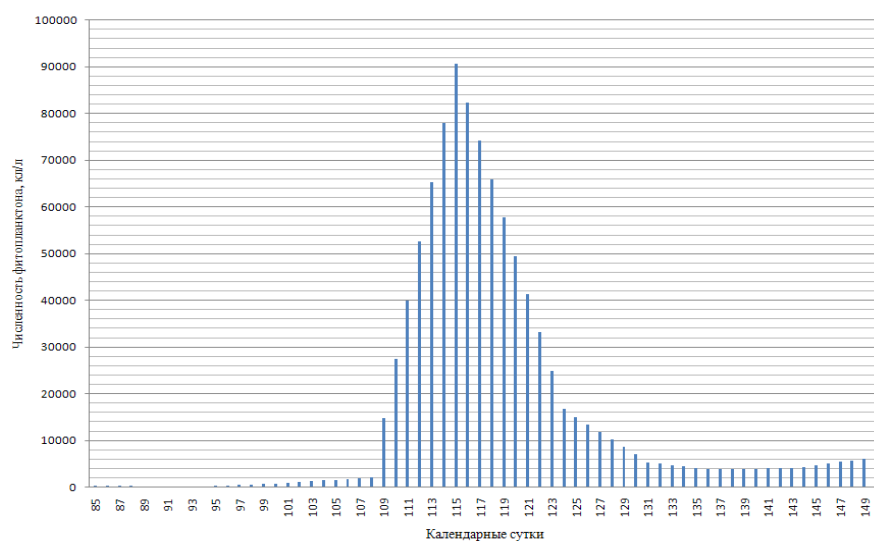


Рис. 3. Гистограмма изменения численности фитопланктона в Учинском водохранилище за весенний период 2000 г.

Гистограмма на рис. 3, описывающая изменение численности фитопланктона весной, имеет форму колокола. Про такое распределение численности микроводорослей мы можем сказать, что это изменение численности в весенний период подчиняется закону Гаусса (распределение Гаусса или нормальное распределение). Смысл такой функции для процесса цветения фитопланктона заключается в том, что по ее графику сразу видно, что максимальная численность микроводорослей, действительно, фиксируется в районе значений календарных суток, которые представлены в таблице 1. Кроме того, для каждого года из периода 1998-2003 гг., удалось выявить, что дата начала цветения фитопланктона выпадает в среднем на 6 дней раньше, чем дата пика цветения, после которого в свою очередь идет резкий спад численности микроводорослей, который и вызывает особый интерес и желание выяснить, какие факторы объясняют это явление.

Стоит рассмотреть влияние биогенных элементов на процесс изменения численности фитопланктона в весенний период. Максимальное содержание нитратов в воде отмечено в апреле, то есть в период, предшествующий весеннему «цветению» фитопланктона (2.5-3.5 мкг/л). После окончания «цветения» диатомовых содержание нитратов в воде снижалось до минимальных значений (0.5 мг/л) и оставалось на таком уровне в течение всего вегетационного сезона. Концентрация нитритов до весеннего пика «цветения» водорослей варьировала в диапазоне 0.010-0.015 мкг/л, несколько увеличиваясь в конце мая – начале июня и особенно в начале августа (0.025 мкг/л) (табл.2). В конце биологической осени величина концентрации нитритов составляла 0.005 мкг/л.

Таблица 2

Содержание биогенных элементов в Учинском водохранилище на момент пика «цветения» фитопланктона за каждый год из рассматриваемого периода

Год	Дата пика, кал. сут.	Численность, кл./л	NO ₃ , мг/л	NH ₄ , мг/л	PO ₄ , мг/л
1999	151	10700	1.344	0.34	0.035
2000	115	90600	1.91	0.25	0.149
2001	123	10720	2.17	0.36	0.02
2002	126	7680	1.46	0.42	0.014
2003	125	79920	2.35	0.19	0.02

В период весеннего цветения диатомовых и летней вспышки синезеленых содержание биогенных элементов снижалось до минимума (0.77 и 0.022 мг/л, соответственно). Затем, в ходе процессов бактериальной деструкции органического вещества планктона, содержание различных форм азота и фосфора восстанавливается, что обуславливает возможность нового интенсивного развития летнего и осеннего комплексов водорослей (рис. 4).

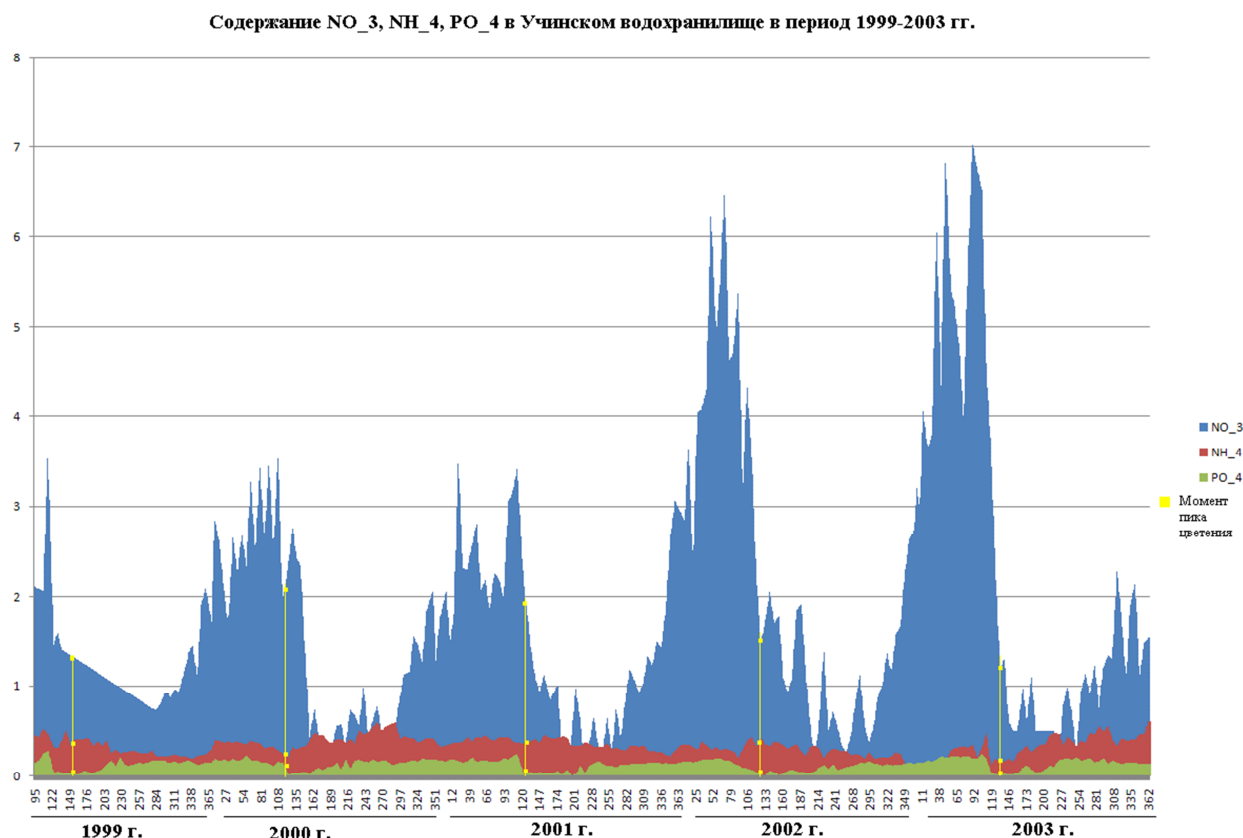


Рис. 4. Содержание биогенных элементов в Учинском водохранилище за период 1999-2003 гг.

Одной из задач нашего ретроспективного анализа материалов, относящихся к сезонной сукцессии фитопланктонного сообщества Учинского водохранилища, был поиск возможных причин окончания резкого возрастания численности диатомовых в период весеннего цветения фитопланктона. Как, известно, наиболее типичные диатомовые водоросли, относящиеся к pp. *Stephanodiscus*, *Asterionella*, *Melosira* являются *r*-стратегами, то есть, их скорость роста не зависит от плотности. В тоже время, исходя из общих экологических представлений о *r*-стратегах, должен существовать максимальный предел численности водорослей в воде (*K*-емкость среды).

В рассматриваемые годы максимумы численности фитопланктона весной варьировали весьма значительно (от 88 до 96000 кл./л) из чего, по нашему мнению, следует, что в этот период ограничивающим фактором роста численности микроводорослей являлась не удельная плотность фитопланктона. То есть, в этот период плотность группы доминирующих диатомовых водорослей не достигала критических величин - «емкости среды». Из представленных данных видно, что в период максимумов весеннего цветения фитопланктона содержание биогенных элементов в воде не снижалось до нулевых величин, то есть, исчерпание запасов биогенных элементов не происходило. Поэтому содержание биогенных элементов в воде, в частности нитратного азота, также не могло в этот период быть лимитирующим фактором. Возможной причиной окончания резкого возрастания численности диатомовых водорослей в этот период является избыточная для этой систематической группировки водорослей солнечная радиация, которая может приводить к фотоингибированию процесса фотосинтеза.

Список литературы

1. Корсак М.Н., Мошаров С.А., Даллакян Г.А., Белов А.Ю., Митин А.В. Динамика фитопланктона Учинского водохранилища и биогенных элементов в 1998-1999 гг. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Биология. 2003. № 2. С. 34-39.
2. Корсак М.Н., Мошаров С.А., Даллакян Г.А., Белов А.Ю. Особенности сезонной динамики, структуры и продуктивности фитопланктона Учинского водохранилища в 1998-2001 гг. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Биология. 2005. № 1. С. 33-38.
3. Talling J.F. The underwater light climate as a controlling factor in the production ecology of freshwater phytoplankton // Mitt. Int. Verein. Limnol. 1971. Vol. 19. P. 214-243.
4. Hitchcock G.L., Smayda T.J. The importance of light in the initiation of the 1972-73 winter-spring bloom in Narragansett Bay // Limnol. Oceanogr. 1977. Vol. 22. P. 126-131.
5. Ramberg L. Relations between phytoplankton and light climate in two Swedish lakes. // Int. Revue ges. Hydrobiol. 1979. Vol. 64. P. 749-782.
6. Horn H., Paul L. Interactions between light situation, depth of mixing and phytoplankton growth during the spring period of full circulation // Int. Rev. ges. Hydrobiol. 1984. V. 69. P. 507-519. DOI: 10.1002/iroh.19840690405.
7. Bleiker W., Schanz F. Influence of environmental factors on the phytoplankton spring bloom in Lake Zürich // Aquatic Sciences. 1989. V. 51. P. 47-58. DOI: 10.1007/BF00877780.

8. Bleiker W., Schanz F. Light climate as the key factor controlling the spring dynamics of phytoplankton in Lake Zurich. // Aquatic Sciences. 1997. V. 59. P. 135-157. DOI: 10.1007/BF02523177.
9. Sommer U. Plankton ecology: Succession in plankton communities. Berlin: Springer Verlag, 1989. 369 p.