

## Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоёмов (литературный обзор)

© 2014. Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д.т.н., зав. кафедрой, зав. лабораторией,  
Т. И. Кутявина<sup>1</sup>, аспирант, Е. А. Домнина<sup>1,2</sup>, к.б.н., доцент, н.с.,

<sup>1</sup>Вятский государственный гуманитарный университет,

<sup>2</sup> Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,  
e-mail: KutyaVINATI@gmail.com

В статье представлен обзор научных работ по изучению процессов эвтрофикации водоёмов. Рассмотрены абиотические и биотические факторы, влияющие на эвтрофикацию. Отмечено, что фитопланктон является начальным звеном для развития процессов эвтрофирования. Показано влияние света, температуры, прозрачности, мутности, минерального состава, динамического режима вод, биогенных элементов на количественные и качественные характеристики фитопланктона. Анализируются данные о цианобактериях, способных вызывать «цветение» воды. Рассматривается возможность применения различных индексов и показателей для оценки трофности водоёмов по зообентосу. Описано применение математического моделирования и технологий с использованием геоинформационных систем в изучении водных экосистем различных климатических зон. Приводятся сведения об особенностях процессов эвтрофирования в естественных и искусственных водоёмах с различными морфометрическими показателями, расположенных на особо охраняемых природных территориях, в городской среде, в крупных промышленных центрах, а также в водоёмах-охладителях.

This paper presents a review of researching the processes of water bodies eutrophication. Abiotic and biotic factors affecting eutrophication are considered. It has been found out that phytoplankton is the initial link of eutrophication processes. The effect of light, temperature, transparency, turbidity, mineral composition, dynamic water regime, and nutrients on qualitative and quantitative characteristics of phytoplankton is shown.

The possibility of using different indices and indicators for assessing the trophic status of reservoirs on zoobenthos is considered. Using mathematical modeling and technology with the use of geographic information systems in the study of aquatic ecosystems of different climatic zones is described. The information is provided on the features of eutrophication processes in natural and artificial reservoirs with different morphometric parameters, located in specially protected areas, in urban areas, in large industrial centers, as well as in reservoirs-coolers.

**Ключевые слова:** эвтрофикация, «цветение» воды, озеро, водохранилище, антропогенная нагрузка, биогенные элементы, фитопланктон, биоиндикация, математическое моделирование.

**Keywords:** eutrophication, “blooming” of water, lake, reservoir, anthropogenic load, nutrients, phytoplankton, bioindication, mathematical modeling.

Проблема загрязнения поверхностных вод стала особо актуальна в XX веке. Связано это в основном с развитием промышленности и ростом городов. Поступление в водоёмы огромного количества загрязняющих веществ приводит к деградации как отдельных компонентов экосистемы, так и целых групп водоёмов [1]. Это, в свою очередь, служит причиной сокращения запасов пресной воды на локальном и региональном уровнях. С середины XX века в связи с ростом антропогенного загрязнения наблюдается стремительное нарастание количества эвтрофированных водоёмов [2]. Согласно определению [3], эвтрофирование – это повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления

биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов. Источником антропогенного поступления биогенных элементов могут быть сточные воды поселений, сельскохозяйственных угодий, промышленных предприятий. При эвтрофикации часто наблюдается «цветение» воды, массовое развитие высших водных растений. Эвтрофикация приводит к снижению рыбохозяйственного и рекреационного потенциала водоёмов, оказывает негативное влияние на системы очистки воды из водных объектов для питьевого водоснабжения [4, 5]. В настоящее время антропогенная эвтрофикация рассматривается как важнейший фактор негативного воздействия человеческой деятельности на водные объекты [6].

Изучение эвтрофикации имеет длительную историю. Исследования по выявлению причин эвтрофикации проводятся с конца XVIII века. Однако до середины XX века работы носили в основном описательный характер. О первых признаках эвтрофирования водоёмов в начале XX века писал Л. Л. Россолимо [2]. Во второй половине XX века процессы антропогенного эвтрофирования затронули большую часть озёр Средней и Южной Европы, США, ряд озёр Северной Европы, России и сопредельных государств бывшего СССР, Азии, особенно Китая и Индии, Японии, ряд озёр Центральной и Южной Америки, Африки и Австралии. Многочисленные примеры деградации озёр рассматриваются в обзоре по развитию исследований процесса эвтрофикации [7]. Во второй половине XX века, в связи с увеличением масштабов эвтрофирования водоёмов, возросло количество экспериментальных работ в этом направлении.

На эвтрофикацию водоёмов оказывают влияние многие факторы. Обычно их делят на две группы: абиотические и биотические. К абиотическим факторам относятся свет, прозрачность, мутность, температура, динамический режим вод, солёность и минеральный состав воды, кислотность, содержание биогенных веществ. Биотические факторы включают в себя фитогенные, зоогенные и антропогенные. Причём антропогенные в последнее время приобрели решающее значение. Об этом свидетельствует работа, выполненная на примере водных экосистем бассейна Верхнего Дона. В ходе данного исследования проведено сопоставление процессов эвтрофирования поверхностных вод этого региона в условиях межледникового периода, голоцена и в современную эпоху [8]. Показано, что эвтрофирование в межледниковое время и в голоцене отражало природную эволюцию водоёмов, а в современных водных экосистемах является следствием антропогенного загрязнения.

Изменение абиотических факторов можно определить как прямым способом, то есть проводя физико-химический анализ водных объектов, так и косвенным, – через изменение структуры и параметров организменных и популяционных характеристик живых организмов – обитателей водоёмов. Известно, что продуценты первого трофического уровня, к которым относится фитопланктон, являются начальным звеном для развития процессов эвтрофирования [9]. В связи с этим изменение их состояния служит индикатором происходящих в водном объекте процессов. В водоёмах

умеренной зоны России в течение многих лет проводились наблюдения за изменением таксономического состава, структуры, динамики и продукционных характеристик планктонных альгоценозов, развивающихся в различных экологических условиях [10–12]. Подобные работы проводились в Уральском регионе [13], но они носили кратковременный характер. В работе О. Г. Гороховой [14] приводятся данные по изучению видового состава фитопланктона 23 малых эвтрофных водоёмов особо охраняемых природных территорий Самарской области. Показано, что изученные водоёмы по полным спискам видов можно объединить в две группы. К первой группе относятся водоёмы, различные по происхождению, реакции среды (рН), цветности, минерализации. Во вторую группу вошли водоёмы с влиянием стрессовых факторов и тем же диапазоном цветности и минерализации, что и водоёмы первой группы. Коллектив авторов из лаборатории альгологии Ботанического института им. В. Л. Комарова составил сводку по водорослям, вызывающим «цветение» пресных водоёмов Северо-Запада России и восточной части Финского залива Балтийского моря [15]. В их работе приводятся сведения о более чем 200 разнотипных водоёмах г. Санкт-Петербурга, Ленинградской, Псковской, Новгородской областей и сопредельных регионов. В исследовании А. Г. Охачкина [16] приводятся данные по изучению фитопланктона водохранилищ в бассейне Средней Волги. Отмечается, что зарегулирование Средней Волги привело к обеднению состава сообществ, упрощению видовой структуры, росту относительного значения цианобактерий (ЦБ) и увеличению сапробности воды. При этом эвтрофирование, различные формы загрязнения, антропогенная трансформация водосборной площади и формы озёрной котловины определяют особенности развития фитопланктона. Характерной закономерностью при эвтрофировании является увеличение доли ЦБ в общей численности и биомассе фитопланктона [17].

При увеличении антропогенного эвтрофирования озёр происходит изменение структуры фитопланктона, увеличение его численности и биомассы [1]. Результаты многолетних исследований состояния экосистемы оз. Воже позволяют проследить динамику количественных и качественных показателей фитопланктона. Сравнительный анализ собранных материалов даёт возможность выявить несколько закономерностей его изменения [18]. В структуре фитоплан-

ктона происходит изменение доминирующего диатомово-цианобактериального комплекса в сторону преобладания ЦБ (более 90% по численности). При этом ЦБ в основном представлены мелкими формами. Смещение размерной структуры в сторону преобладания мелких, более продуктивных форм, заметное увеличение численности и биомассы фитопланктона подтверждают ускорение процессов эвтрофирования оз. Воже. Экспериментальными работами [19] показано, что прирост биомассы водорослей идёт пропорционально количеству поглощённого света до определённого предела, после чего наступает световое насыщение, и развитие водорослей замедляется. Отмечается, что чрезмерно сильный свет может действовать на водоросли губительно [20]. Появление в планктоне весной определённых видов диатомовых водорослей связывается с увеличением света и проникновением его в придонные слои [21]. Помутнение воды может способствовать развитию диатомовых водорослей [22, 23]. Объясняется это тем, что при помутнении увеличивается содержание в воде минеральных веществ. В то же время в реках и водохранилищах даже незначительное помутнение воды всегда связано с уменьшением видового состава планктонных водорослей. Особенно чувствительны к этому фактору ЦБ из родов *Anabaena* и *Microcystis* [23]. На распределение фитопланктона большее влияние оказывают такие факторы, как свет, температура, содержание растворённого органического вещества [24].

На жизнедеятельность водорослей оказывает влияние динамический режим вод. Отмечается положительное влияние динамического фактора на продуктивность планктона в глубоководных водоёмах [25]. Оно состоит в лучшем снабжении клеток питательными веществами, а в мелководных водоёмах движение воды увеличивает мутность, что отрицательно влияет на развитие планктонных водорослей. Скорость воспроизводства фитопланктона является функцией двух факторов среды: солнечной радиации и силы ветра, от которой зависит глубина перемешивания [26]. В 2006-2008 гг. были организованы специальные наблюдения на Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах. В результате исследования [27] было отмечено, что наиболее неблагоприятная экологическая обстановка складывается на приплотинных плёсах водохранилищ при отсутствии стокового течения, ветрового перемешивания и наличия высоких температур воды (+25–27°C). Также подчёркивается, что

создание и эксплуатация крупных плотин на Средней и Нижней Волге вызывает изменение первичной биологической продуктивности водохранилищ, обусловленное замедлением водного обмена и нарушением круговорота биогенных веществ на водохранилищах.

Множество работ, среди которых важное место занимают работы как отечественных исследователей [21, 28–32], так и зарубежных [33–38], посвящено выяснению роли химических элементов в жизни водорослей. Стоит заметить, что мнения о значимости того или иного химического элемента часто не совпадают. Например, установлено, что планктонные диатомовые водоросли хорошо развиваются тогда, когда воды богаты нитратами, фосфатами и кремнием, т. е. весной и зимой; зелёные водоросли появляются летом, когда нитратов и фосфатов мало; золотистые могут приходить на смену диатомовым, если в воде повышенные отношения нитратов к фосфатам и мало кремния; ЦБ способны быстро расти при минимальном количестве нитратов и фосфатов и положительно коррелируют с содержанием органических веществ [39]. По другим данным, число видов ЦБ не зависело от содержания фосфатов, в то время как число золотистых и зелёных снижалось с увеличением концентрации соединений фосфора в воде [40]. Результаты изучения Шершнёвского водохранилища показали, что фосфор играет важную роль для развития ЦБ, а для диатомовых водорослей имеет второстепенное значение [41]. В этом же исследовании отмечается влияние кремния на фитопланктон: содержание в воде растворённых форм кремния играет решающую роль в преимущественном росте и развитии диатомовой микрофлоры и отрицательно сказывается на развитии ЦБ в водоёме. Некоторые авторы считают, что увеличение нагрузки по фосфору приводит к сукцессии видов, которая проявляется в замене диатомовых водорослей зелёными, а затем и ЦБ [42]. Сравнительная оценка отклика фитопланктона на содержание фосфора была получена на примере крупных равнинных водохранилищ Днепра и Волги. Был проведён анализ соотношения между содержанием хлорофилла *a* и фосфора [43]. Показано, что эффективность использования фосфора планктоном большинства днепровских водохранилищ меньше, чем волжских водохранилищ. При этом более значительная антропогенная нагрузка отмечалась на днепровских водохранилищах.

Проводилась экспериментальная работа по изучению влияния добавок биогенных

элементов на фитопланктон [44-46]. В литературе приводятся данные о концентрациях биогенных элементов, которые оказывают стимулирующее, лимитирующее либо токсическое действие на развитие некоторых отделов водорослей. Наиболее благоприятны для развития фитопланктона концентрации азота 5-10 мг/л в форме нитрат-иона [47]. Аммонийный азот в концентрации 5 мг/л токсичен для ЦБ [48]. Концентрация минерального фосфора 0,01 мг/л – порог лимитирования для ЦБ [49]. Когда отношение общего азота к общему фосфору менее 10 (или отношение неорганических форм этих элементов менее 5), развитие фитопланктона лимитирует азот, а когда оно более 12, лимитирует фосфор [20, 50]. В работе, проведённой на Можайском водохранилище, отмечается, что малый внутренний круговорот фосфора с участием хемогенного кальцита является важным регулятором процесса «цветения» воды [51].

О степени загрязнения и эвтрофирования водных объектов можно судить по наличию индикаторных видов фитопланктона. По степени загрязнённости воды органическими веществами водоёмы и живущие в них организмы делят на поли-, мезо- и олигосапробные [52]. В полисапробной зоне водоёма отсутствует свободный кислород, преобладают бактерии, водоросли многочисленны, но их видовое разнообразие невелико. В мезосапробной зоне присутствуют сероводород, диоксид углерода, кислород, выделяемый водорослями. Мезосапробную зону делят на  $\alpha$ -мезосапробную и  $\beta$ -мезосапробную. В первой зоне присутствует аммиак и аминокислоты, минерализация осуществляется за счёт аэробного окисления, встречаются водоросли. Во второй зоне присутствует аммиак и продукты его окисления, много кислорода. Наблюдается высокое видовое разнообразие водорослей, но их численность может быть ниже, чем в  $\alpha$ -мезосапробной зоне. В олигосапробной зоне практически нет растворённых органических веществ, много кислорода, небольшая численность водорослей. В Ижевском водохранилище из 250 видов и внутривидовых таксонов водорослей индикаторами органического загрязнения являются 146 таксонов, в том числе 17  $\alpha$ -мезосапробов, 110  $\beta$ -мезосапробов и 19 олигосапробов [53]. Высокую общую численность фитопланктона, большей частью представленного ЦБ, авторы связывают с поступлением в водоём биогенных элементов.

Большое количество работ как российских, так и зарубежных авторов посвящено изучению

ЦБ. Определённые виды нитчатых и колониальных форм ЦБ при наличии комплекса благоприятных условий для их развития способны вызывать «цветение» воды [54–56]. Масштабные исследования по изучению эвтрофикации и «цветения» воды в водоёмах Европейской части России проводились Л. А. Сиренко. Её работы посвящены изучению ЦБ, их роли в «цветении» воды и методам его регулирования [4, 54, 57]. Данные о видовом богатстве ЦБ в разнотипных водоёмах Ирана приведены в работе Б. Зарей Дарки [58]. Описаны флористические и функциональные аспекты цианобактериального «цветения» разнотипных водоёмов восточно-европейских тундр [59].

Для выявления степени эвтрофирования водоёмов используют гидробионтов, чаще всего зоопланктонные и зообентосные организмы. Разработаны различные индексы и показатели, позволяющие оценить трофность водных объектов. При изучении экологического состояния Кучурганского водохранилища, используемого в качестве водоёма-охладителя, применялись такие показатели, как Карра и Хилтонена, Гуднайта и Уитлея, Ландбека и Сизера; индексы Кинга и Балла, сапробности Пантле и Букка [60]. Было отмечено, что для целей биоиндикации в водохранилищах-охладителях непроточного типа умеренной зоны наиболее целесообразно использовать индексы Гуднайта и Уитлея, Карра и Хилтонена, Пантле и Букка. Показатель Ландбека и Сизера более приемлем для биоиндикации водоёмов с естественным термическим режимом. Проводились работы по модификации индекса Пантле-Букка для малых водотоков центра Европейской России, для водоёмов разных типов на всей территории Европейской России [61]. Результаты многолетних гидробиологических исследований на Можайском водохранилище, в том числе результаты по изучению простейших организмов (инфузорий), показали, что количественные показатели развития инфузорий и величина их продукции зависят от трофического статуса водоёма [62].

В работах по изучению степени эвтрофирования на однотипных водохранилищах, расположенных вблизи металлургических заводов, использовали физико-химические и биоиндикационные методы [63, 64]. Для оценки состояния поверхностных водных объектов в зоне влияния химического комбината проводили сопоставление результатов гидрохимического анализа с данными, полученными при биотестировании по двум тест-объектам [65]. Отмечается, что *Daphnia magna* чувствительна

к повышенному радиационному фону, а *Paramecium caudatum* – к повышенному содержанию железа и тяжёлых металлов. Методы биотестирования применяли при оценке качества воды водоёма-охладителя Балаковской АЭС. Показано, что высокая концентрация солей в воде может оказывать негативное влияние на одноклеточные организмы [66].

В последнее время всё больше работ по изучению процессов эвтрофирования водных объектов выполняется с применением методов математического моделирования и компьютерных технологий, в частности с применением геоинформационных систем (ГИС). Основа для разработки математических моделей эвтрофирования была заложена в 1970-х гг. [67–69]. Условно все модели эвтрофирования можно разделить на две группы: качественно-аналитические и эмпирические; имитационные (портретные) [70]. Для моделей первой группы характерно использование небольшого количества моделируемых параметров состояния, исследование средних для водоёма стационарных условий протекания процесса эвтрофирования. Модели второй группы детализированы, многокомпонентны и требуют больших объёмов исходной информации. Имитационное моделирование успешно применяется для прогнозирования развития процесса эвтрофирования водоёмов, но не позволяет в целом охватить экосистему. Качественно-аналитическое моделирование позволяет не только прогнозировать течение процесса эвтрофирования, но и затрагивает его механизмы и их сущность. При использовании этого подхода моделируют эвтрофирование с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. В модели одного из малых озёр в Дании, подвергавшемуся загрязнению бытовыми сточными водами, рассматривались три трофических уровня: фитопланктон, зоопланктон, ихтиофауна, а также три независимых цикла биогенных элементов (фосфора, азота, углерода) [71]. В результате численных экспериментов установлено, что наиболее чувствительными параметрами модели являются максимальная скорость роста фито- и зоопланктона, смертность зоопланктона, максимальные скорости дыхания фито- и зоопланктона, скорость осаднения водорослей, максимальная скорость потребления углерода фитопланктоном. Математическое моделирование процессов эвтрофирования применялось для водоёмов-охладителей гидроэлектростанций [72–74]. Моделирование применяли при исследовании переноса загрязнений в водо-

хранилищах, расположенных в криолитозоне [75]. При этом учитывались возможные деформации русел, вызванные таянием слагающих их многолетнемерзлых пород при повышении температуры воды речного потока. Разработанная математическая модель распространения примеси в потоках с деформируемыми руслами, сложенными многолетнемерзлыми породами, позволяет описывать происходящие процессы и давать прогностические оценки их динамики в условиях изменения климата. При математическом моделировании процессов «цветения» воды Куйбышевского водохранилища были представлены локальная, одномерная и двухмерная модели процессов эвтрофирования [76]. Методы математического моделирования применялись для изучения Ладожского озера [77–79]. В результате отмечено, что решающим фактором, определяющим трансформацию экосистемы, являлось изменение фосфорной нагрузки.

Для оценки воздействия антропогенной деятельности на водосборе на гидроэкологическое состояние водных объектов используются картографические методы с применением ГИС-технологий [80]. Установлена связь между пространственной структурой хозяйственной деятельности на водосборе и качеством водных ресурсов в Шершневском водохранилище. ГИС-моделирование использовалось для изучения Нижнезырянского водохранилища в Пермском крае. Для данного водоёма была создана модель пространственного распределения донных отложений, произведено зонирование дна по степени экологической опасности [81]. Для оценки биопродуктивности морских и континентальных водоёмов очень часто применяют данные дистанционного зондирования Земли. При этом ключевым показателем является концентрация хлорофилла *a* – фотосинтезирующего пигмента, содержащегося в каждом виде фитопланктона. При оценке биопродуктивности используются эмпирические соотношения концентрации хлорофилла и спектральных характеристик восходящего из водного объекта излучения. Применяемые в настоящее время алгоритмы оценки концентрации хлорофилла *a* по данным спутниковых сканеров цвета для акватории Азовского моря приводят к ошибочным результатам [82]. Для того чтобы получать более достоверные результаты, необходимо проводить корректировку алгоритмов для высокопродуктивных и мутных прибрежных, внутренних вод и эстуариев, где фитопланктон является не единственным фактором, определяющим их оптические свойства.

В целом, математическое моделирование в совокупности с лабораторными экспериментами и полевыми наблюдениями позволяет получать более точные количественные оценки, выявлять наиболее значимые факторы в развитии процессов эвтрофирования, загрязнения водных объектов.

### Литература

1. Еремкина Т.В. Структура и функционирование фитопланктона озер северной части Увильдинской зоны (Челябинская область) в условиях антропогенного эвтрофирования: дисс. ... к.б.н. Науч. исслед. институт водн. биоресурсов и аквакультуры, Екатеринбург, 2010. 139 с.
2. Россолимо Л.Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 120 с.
3. ГОСТ 17.1.1.01-77 Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения.
4. Сиренко Л.А., Гавриленко М.Я. «Цветение» воды и эвтрофирование. Киев: Наук. думка, 1978. 230 с.
5. Paerl H. W. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine and inland waters // *Limnol. Oceanogr.* 1988. V.33. №4 (p.2). P. 823–847.
6. Кучкина М.А. Особенности процессов эвтрофирования в водоемах-охладителях АЭС: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М. 2004. 25 с.
7. Sakamoto M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth // *Arch. Hydrobiol.* 1966. V. 62. P. 1–28.
8. Анциферова Г. А. Биоиндикация в геоэкологии: об эвтрофировании межледниковых голоценовых и современных поверхностных водных систем бассейна Верхнего Дона // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология.* 2001. № 1. С. 240–250.
9. Изменение структуры экосистем озёр в условиях возрастающей биогенной нагрузки. Л. 1988. 312 с.
10. Петрова Н. А. Сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофировании больших озер. Л. 1990. 200 с.
11. Трифонова И. С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона Л. 1990. 184 с.
12. Влияние климатических изменений и эвтрофирования на динамику планктонных популяций мезотрофного озера. СПб. 2003. 125 с.
13. Ярушина М. И., Танаева Г. В., Еремкина Т. В. Флора водорослей водоемов Челябинской области. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 308 с.
14. Горохова О.Г. Разнообразие планктонных альгоценозов малых эвтрофных водоёмов ООПТ Самарской области (Россия) // *Актуальные проблемы современной альгологии: Тезисы докладов IV Международной конференции.* Киев. 2012. С. 82–83.

15. Водоросли, вызывающие «цветение» водоемов Северо-Запада России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 367 с.
16. Охупкин А.Г. Особенности структурной организации фитопланктона водоёмов разного типа бассейна Средней Волги (Россия) // *Актуальные проблемы современной альгологии: Тезисы докладов IV Международной конференции.* Киев. 2012. С. 228–229.
17. Петрова Н.А. Сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофировании больших озёр. Л. 1990. 199 с.
18. Макаренкова Н.Н. Изменение фитопланктона озера Воже как показатель его эвтрофирования // *Актуальные проблемы биологии и экологии: Материалы докладов XIX Всероссийской молодежной научной конференции.* Сыктывкар. 2012. С. 153–155.
19. Финенко З.З. Влияние света на фотосинтез и рост морских планктонных водорослей // III съезд Всесоюз. гидробиол. о-ва: Тез. докл. Рига: Зинатне, 1976. Т. 1. С. 126–127.
20. Михеева Т. М. Сукцессия видов в фитопланктоне: определяющие факторы. Минск. 1983. 72 с.
21. Гусева К. А. «Цветение» воды, его причины, прогноз и меры борьбы с ним // *Труды всесоюзного гидробиологического общества.* М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 3–92.
22. Шаларь В. М. Фитопланктон водохранилищ Молдавии. Кишинев: Штиница, 1972. 204 с.
23. Судницына Д. Н. Экология водорослей Псковской области. Псков: ПГПУ, 2005. 128 с.
24. Herbst R. P., Hartman R. T. Phytoplankton Distribution of a Duckweed Covered Pond // *Journal of Freshwater Ecology.* 1981. Vol. 1. P. 97–111.
25. Gessner F. *Hydrobotanik. Die physiologischen Grundlagen der Pflanzenverbreitung in Wasser.* 1. *Energhehaushalt.* Berlin. 1955. 517 s.
26. Кушинг Д. Х. Продукционные циклы во времени и в пространстве: Морская экология и рыболовство. М. 1979. 288 с.
27. Селезнёв В. А., Селезнёва А. В. Влияние плотин на создание благоприятных условий для «цветения» воды на крупных водохранилищах // Тольятти, Институт экологии Волжского бассейна РАН / Режим доступа: <http://russiandams.ru/sites/russiandams/files/review-page/files/seleznev.doc>
28. Успенский Е. Е. Железо как фактор распределения водорослей // *Труды Бот. ин-та Ассоциации науч.-исслед. ин-тов при физ.-мат. фак.* 1 Моск. гос. ун-та, 1925. С. 1–94.
29. Кузнецов С. И. Биологический метод оценки богатства водоема // *Микробиология.* 1945. Т. 14. № 4. С. 248–253.
30. Брагинский Л. П. О соотношении между составом прудового фитопланктона и проявлением его «потребности» в биогенных элементах // *Первичн. продукция морей и внутр. вод.* Минск. 1981. С. 139–147.

31. Винберг Г. Г., Ляхнович В. П. Удобрения прудов. М. 1965. 272 с.
32. Ведерников В. И., Сергеева О.М., Коновалов Б. М. Экспериментальное изучение зависимости роста и фотосинтеза фитопланктона Черного моря от условий минерального питания // Экосистемы пелагиали Черного моря. М. 1980. С. 140–157.
33. Straw B. Algae Control: Literature Analysis. 2005. Режим доступа: [https://www.sdstate.edu/nrm/outreach/pond/upload/barley\\_algae-control.pdf](https://www.sdstate.edu/nrm/outreach/pond/upload/barley_algae-control.pdf)
34. Imai H., Chang K.-H., Kusaba M., Nakano S. Succession of harmful algae *Microcystis* (Cyanophyceae) species in a eutrophic pond // *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry-Biological Responses to Chemical Pollutants*. 2008. P. 367–372.
35. Total Maximum Daily Loads for Phosphorus To Address 9 Eutrophic Ponds in Rhode Island // Office of Water Resources Rhode Island Department of Environmental Management 235 Promenade St. Providence, RI 02908. 2007. Режим доступа: [http://www.epa.gov/waters/tmldocs/33490\\_eutropnd.pdf](http://www.epa.gov/waters/tmlddocs/33490_eutropnd.pdf)
36. Stevens R. J. J., Neilson M. A. Response of Lake Ontario to the reductions in phosphorus load, 1967-82 // *Canad. J. Fish. Res. Aquat. Sci.* 1987. V. 44. № 12. P. 2059–2068.
37. Raney S. M., Eimers M. C. Unexpected declines in stream phosphorus concentrations across southern Ontario // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2014. № 71(3). P. 337–342.
38. Schein A., Courtenay S. C., Kidd K. A., Campbell K. A., Van den Heuvel M. R. Food web structure within an estuary of the southern Gulf of St. Lawrence undergoing eutrophication // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2013. № 70 (12). P. 1805–1812.
39. Pearsall W.H. Phytoplankton in the English lakes 2. The composition of the phytoplankton in relation to dissolved substances // *J. Ecol.* 1932. V. 20. P. 241–262.
40. Hegewald E., Hesse M., Jeeti-Bai N. Okologische und physiologische Studien an Planktonalgen aus ungarischen Gewässern // *Arch. Hydrobiol.* 1981. Suppl. V. 60. 2. S. 172-201.
41. Ходоровская Н.И., Стурова М.В. Исследование влияния концентраций кремния и фосфора на развитие диатомовой микрофлоры водоёма // *Известия Челябинского научного центра*. 2002. Вып. 2 (15). С. 50–53.
42. Сиделев С.И. Сукцессия фитопланктона высокоэвтрофного озера Неро: Автореф... канд. биол. наук. Борок. 2010. 27 с.
43. Курейшевич А.В., Минеева Н.М., Сигарева Л.Е., Медведь В.А. Соотношение между содержанием хлорофилла *a* и фосфора в водохранилищах Волги и Днепра // *Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Тр. Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. Т. 2. Химический состав и качество воды*. Пермь. 2013. С. 112–117.
44. Kagawa H., Togashi M. Contribution of dissolved calcium and magnesium to phytoplanktonic particulate phosphorus concentration at the heads of two river reservoirs // *Hydrobiologia*. 1989. V. 183. P. 185–193.
45. Ключенко П. Д., Медведь В. А. Влияние свинца и меди на некоторые показатели жизнедеятельности зеленых и сине-зелёных водорослей // *Гидробиологический журнал*. 1999. Т. 35. № 6. С. 52–62.
46. Елизарова В. А. Марганец и медь как факторы роста фитопланктона в мезотрофном водоеме (Рыбинское водохранилище) // *Биология внутренних вод*. 2000. № 3. С. 35–41.
47. Гусева К.А. Роль сине-зелёных водорослей в водоеме и факторы их массового развития // *Экология и физиология сине-зелёных водорослей*. М.-Л. 1965. С. 12–32.
48. Сакевич А. И. Метаболизм водорослей как фактор детоксикации аммонийного азота водной среды // *Альгология*. 1997. Т. 7. № 1. С. 3–9.
49. Кравчук Е.С. Эколого-физиологические аспекты «цветения» воды сине-зелёными водорослями в двух разнотипных водохранилищах (район Красноярск): Дис. ... канд. биол. наук. Институт биофизики. Красноярск, 2004. 100 с.
50. Макарецва Е. С., Трифонова И. С. Особенности сезонного функционирования сообществ фито- и зоопланктона в озерах различной трофии // *Антропогенные изменения экосистемы малых озёр (причины, последствия, возможность управления)*. СПб. 1991. С. 300–304.
51. Эдельштейн К.К., Ершова М.Г., Заславская М.Б. Биохомогенный кальцит – важный компонент круговорота веществ в эвтрофном Можайском водохранилище // *Водные ресурсы*. 2005. Т. 32. № 4. С. 477–488.
52. Штина Э.А., Кондакова Л.В., Маркова Г.И. Биоиндикация качества воды с использованием водорослей (альгоиндикация) // *Экология родного края*. Киров: Вятка, 1996. С. 297–302.
53. Иванова Н.А., Шарипова Л.А. Состояние фитопланктона Ижевского пруда в районе водозабора МУП города Ижевска «ИЖВОДОКАНАЛ» в 2002-2005 годах // *Вестник Удмуртского университета*. 2006. № 10. С. 17–24.
54. Сиренко Л.А. Физиологические основы массового размножения сине-зелёных водорослей в водохранилищах и методы его регулирования: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Киев. 1970. 48 с.
55. Гусева К. А. «Цветение» воды, его причины, прогноз и меры борьбы с ним // *Труды всесоюзного гидробиологического общества*. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 3–92.
56. Elser J. J. The pathway to noxious cyanobacteria blooms in lakes the food web as the final turn // *Freshwater Biology*. 1999. V. 42. P. 537–543.
57. Сиренко Л.А. Физиологические основы размножения сине-зелёных водорослей в водохранилищах. Монография. Киев: Наук. думка, 1972. 203 с.
58. Зарей Дарки Б. Суанопрокaryota разнотипных водоёмов Ирана // *Альгология*. 2010. Т. 20. № 4. С. 482–491.

59. Патова Е.Н. Цианопрокариотическое «цветение» водоёмов восточноевропейских тундр (флористические и функциональные аспекты) // Теоретическая и прикладная экология. 2007. № 3. С. 4–10.
60. Филипенко С.И. Оптимизация методов оценки экологического состояния Кучурганского водохранилища по зообентосу // Managementul integral al resurselor naturale din bazinul transfrontalier al fluviului Nistru. Materialele Conferintei Internationale. Chisinau: Eco-Tiras. 2004. С. 343–347.
61. Чертопруд М.В. Модификация метода Пантле-Бука для оценки загрязнения водотоков по качественным показателям макрозообентоса // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 3. С. 337–342.
62. Садчиков А.П., Котелевцев И.С. Можайское водохранилище: продукционно-деструкционные процессы. Режим доступа: [http://www.moip.msu.ru/wp-content/uploads/2011/09/Mojajskoi\\_vodohr.pdf](http://www.moip.msu.ru/wp-content/uploads/2011/09/Mojajskoi_vodohr.pdf)
63. Кутявина Т.И., Домнина Е.А., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Морфометрические, гидрохимические и биологические особенности прудов Северо-Востока Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 2. С. 50–55.
64. Кутявина Т.И., Домнина Е.А., Ашихмина Т.Я. Оценка качества воды Омутнинского водохранилища с использованием физико-химических и биоиндикационных методов // Проблемы региональной экологии. 2014. № 1. С. 131–137.
65. Олькова А.С., Скугорева С.Г., Адамович Т.А., Вараксина Н.В., Ашихмина Т.Я. Оценка состояния водных объектов методами биотестирования в зоне влияния промышленных предприятий (на примере Кирово-Чепецкого химического комбината) // Теоретическая и прикладная экология. № 3. 2011. С. 46–52.
66. Чупис В.Н., Журавлёва Л.Л., Жирнов В.А., Ларин И.Н., Луцкая Е.А., Емельянова Н.В., Ильина Е.В., Иванов Д.Е. Оценка качества воды водоёма-охладителя Балаковской атомной электростанции методами биомониторинга // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 2. С. 43–50.
67. Geier P. W., Clark L. R., Anderson D. J., Nix N. A. Studies in Population Management. 1973. Vol. 1. Occasional Papers, Ecol. Soc. Australia, Canberra. P. 85–102.
68. Gold H.J. Mathematical Modeling of Biological Systems. An Introductory Guidebook. John Wiley & Sons. New York. 1977. 357 p.
69. Hornberger G.M., Spear R.C. Eutrophication in Peel Inlet-I. The problem-defining behavior and a mathematical model for the phosphorus scenario // Wat. Res. 1980. V. 14. P. 29–42.
70. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
71. Алексеев В.В., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Физическое и математическое моделирование экосистем. СПб: Гидрометеиздат, 1992. 368 с.
72. Белолипецкий В.М., Туговиков В.Б., Цхай А.А. Численное моделирование процессов эвтрофирования в нижнем бьефе водохранилища-охладителя // Вычислительные технологии. Т. 2. № 2. 1997. С. 5–19.
73. Максимов В.И., Кузнецов Г.В., Литвак В.В. Математическое моделирование процессов биологического загрязнения технологических водоёмов тепловых электрических станций // Известия Томского политехнического университета. Т. 314. № 4. 2009. С. 16–20.
74. Солохина Т.Ф. Определение факторов эвтрофикации природно-техногенной системы водоёма-охладителя на примере Березовской ГРЭС-1. Дисс. ... канд. биол. наук. Красноярск. 2003. 128 с.
75. Дебольский В.К., Дебольская Е.И. Математическое моделирование распространения загрязнений в условиях термальной и механической эрозии берегов // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Тр. Междунар. науч.-практ. конф. в 3 т. Т. 2: Химический состав и качество воды. Пермь. 2013. С. 63–68.
76. Крестин С.В. Математическое моделирование пространственно-распределённых экосистем: На примере процессов «цветения воды» пресноводных водоёмов. Дисс. ... канд. техн. наук. Ульяновск. 2004. 102 с.
77. Руховец Л.А., Астраханцев Г.П., Минина Т.Р., Полосков В.Н. Петрова Н.А., Тержевик А.Ю., Филатов Н.Н. Великие озера Европы и глобальное потепление // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2011. Т. 18. Вып. 2. С. 218–234.
78. Astrakhantsev G. P., Egorova N. B., Menshutkin V. V., Pisulin I. V., Rukhovets L. A. Mathematical model for the ecosystem response of Lake Ladoga to phosphorus loading // Hydrobiologia. 1996. V. 322. P. 153–157.
79. Menshutkin V. V., Astrakhantsev G. P., Yegorova N. B., Rukhovets L. A., Simo T. L., Petrova N. A. Mathematical modelling the evolution and current conditions of Ladoga Lake ecosystem // Ecol. Modelling. 1998. V. 107. № 1. P. 1–24.
80. Бобылев А.В. Создание механизма управления экосистемой малого водохранилища в условиях возрастания антропогенной нагрузки (на примере Шершневого водохранилища, г. Челябинск): Автореф. ... канд. геогр. наук. Челябинск. 2012. 26 с.
81. Максимович Н.Г., Ворончихина Е.А., Пьянков С.В., Первова М.С., Шавнина Ю.Н. Оценка мощности и экологических характеристик донных отложений водохранилища с помощью геоинформационного моделирования // Инженерные изыскания. 2011. № 1. С. 1–7.
82. Сапрыгин В.В. Изучение распределения хлорофилла *a* в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и результатам судовых измерений: Автореф. ... канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону. 2011. 25 с.