ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2025, том 9, № 2, с. 131-144

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 574.51

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ЭВТРОФИРОВАНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ (ОБЗОР)

© 2025 г. Ю.С. Даценко

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: yuri0548@mail.ru, datsenko_nina@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2025. После доработки 01.05.2025. Принята к публикации 01.06.2025.

Анализируются современные представления об эффективности действия комплекса абиотических факторов первичной продуктивности водоемов, включающего гидрологические, гидрофизические и гидрохимические факторы. Рассматриваются различия в развитии процесса эвтрофирования в озерах и водохранилищах и проблемы, связанные с оценкой трофического статуса водоемов. С использованием результатов модельных расчетов на примере Можайского водохранилища показаны особенности тенденций изменения состояния экосистемы водохранилища.

Ключевые слова: эвтрофирование, первичная продуктивность, абиотические факторы, водохранилища.
DOI: 10.24412/2542-2006-2025-2-131-144
EDN: ZZQFIN

В настоящее время есть много оснований считать, что примерно с 1970-х годов исследование процесса эвтрофирования водоемов стало и до сих пор остается наиболее актуальной темой современной лимнологии. Особое внимание лимнологов к этому явлению обусловлено по крайней мере двумя причинами.

Первая причина имеет определенное практическое значение. Эвтрофирование водоемов, представляющее собой резкое увеличение первичной продуктивности экосистем в результате обусловленного антропогенным загрязнением роста поступлений биогенных веществ в водоемы приводит к увеличению общего содержания органического вещества в воде. При современных преимущественно реагентных методах водоподготовки именно содержание органического вещества в водоемах, служащих источниками коммунального водоснабжения, – главная причина проблем очистки воды на водопроводных станциях. (Шушкевич и др., 2010). Кроме того, интенсивное развитие фитопланктона в вегетационный период водоемов увеличивает мутность воды – одного из основных показателей качества источников питьевого водоснабжения. С цветением водоемов связано также появление в них специфических запахов и токсинов, выделяемых цианобактериями (Сухаревич, Полак, 2020).

Вторая причина связана с теоретическими вопросами лимнологии. Повышение продуктивности экосистем и изменение трофического состояния водоемов сопровождается глубокой перестройкой экосистемы – как ее структуры, так и особенностей ее функционирования. Поэтому важным теоретическим направлением исследований стала оценка интенсивности и направленности этих изменений, их особенностей в водоемах различных природных зон и различного генезиса.

Такое особое внимание к проблеме стимулировало появление ряда крупных международных программ мониторинга процесса эвтрофирования, например, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) 1982 года и HELCOM’s Baltic Sea Action Plan 2007 года. Обобщение результатов этих программ позволило установить основные

причины и закономерности процесса эвтрофирования еще во второй половине XX века. Но уже тогда стало ясно, что этот процесс развивается медленно, поэтому перестройка экосистемы водоема и изменения темпов и характера органо-биогенного круговорота веществ даже при интенсивном антропогенном воздействии занимает годы и десятилетия, поэтому перспективы изучения эвтрофирования и тем более разработка методов управления этим процессом связаны исключительно с необходимостью моделирования органо-биогенного круговорота веществ в экосистемах водоемов.

Первые качественно-аналитические модели, связанные с именем швейцарского лимнолога Р. Фолленвейдера (Vollenwaider, 1975), обусловили появление большого числа эмпирических оценок зависимости продуктивности озерных экосистем от нагрузки биогенными веществами и сыграли важную роль в исследовании закономерностей эвтрофирования (Rast, Lee, 1978; Walker, 1982; Reckhaw, 1979; Даценко, 2007; Мусатов, 1981; Науменко, 2007), Однако эти модели довольно быстро исчерпали себя, поскольку при исключительно высокой изменчивости продукционных процессов скорость и направленность эвтрофирования характеризуются значительной нестационарностью и непредсказуемостью, связанной с колебаниями внешнего воздействия на экосистему в виде постоянно меняющихся гидрологических и синоптических условий. Поэтому в моделировании аналитические модели Р. Фолленвейдера уже давно сменили попытки воспроизвести как можно детальнее весь комплекс процессов органо-биогенного круговорота с помощью максимально детальных имитационных гидроэкологических моделей (Абакумов, 2000; Меншуткин, 2010; Леонов, Пищальник, 2012). В центре этих моделей эвтрофирования всегда находится переменная «фитопланктон», при этом даже самая простая блок-схема моделируемых связей фитопланктона характеризуется значительным их разнообразием (Даценко, Пуклаков, 2020). Число параметров и факторов как абиотических, так и биотических, определяющих процессы первичного продуцирования, очень велико и, как в моделировании, так и при обобщении результатов мониторинга и полевых экспериментов, оценкам значимости этих факторов уделялось и продолжает уделяться особое внимание. Но если биотические факторы (сезонные изменения физиологического состояния клеток водорослей, трофические взаимодействия, конкуренция за источники питания), подчиняющиеся фундаментальным биологическим закономерностям, изменяются относительно медленно, то абиотические факторы, связанные с гидролого-гидрохимическим режимом водоема, характеризуются высокой внутрисезонной и даже внутрисуточной изменчивостью. Именно благоприятное для развития роста и размножения клеток фитопланктона сочетание абиотических факторов приводят к резким вспышкам в развитии водорослей.

В блок-схемах фитопланктона в любой модели обязательно учитываются 3 главных прямых абиотических фактора: освещенность, температура воды и биогенное питание. Эти прямые факторы эвтрофирования контролируются комплексом внутриводоемных процессов: гидрологическими, гидрофизическими, гидрохимическими.

Среди гидрологических факторов особое место занимает интенсивность водообмена, на котором основано весьма распространенное мнение о возможности регулирования первичной продуктивности водоема разбавлением (Никитин, Латыпова, 2014; Попов и др., 2017; Welch, Patmont, 1980; рис. 1)

Этому фактору особое внимание уделялось уже при первых попытках количественных оценок воздействий гидрологического режима на процессы в экосистеме (Dickman, 1969; Шпет, Кубышкин, 1968; Кожова, 1975). Однако увеличение проточности как оздоровительное мероприятие для водоемов наиболее эффективно при достижении скорости водообмена, составляющего 10-15% от его объема (а это очень интенсивный водообмен)

в сутки или когда скорость вымывания планктона за счет водообмена становится соизмеримой со скоростью его роста (Никитин, Латыпова, 2014). В то же время в большинстве водоемов (даже водохранилищ, водообмен которых значительно выше, чем в озерах) проточность намного ниже, поэтому прямое влияние этого фактора весьма сомнительно. Это подтверждается отсутствием связи продуктивности волжских водохранилищ с коэффициентом водообмена в широком диапазоне проточности водохранилищ от слабообменного Рыбинского с коэффициентом водообмена 1.4 л/год до высокопроточного Саратовского (19.0 л/год; Даценко, 2007).

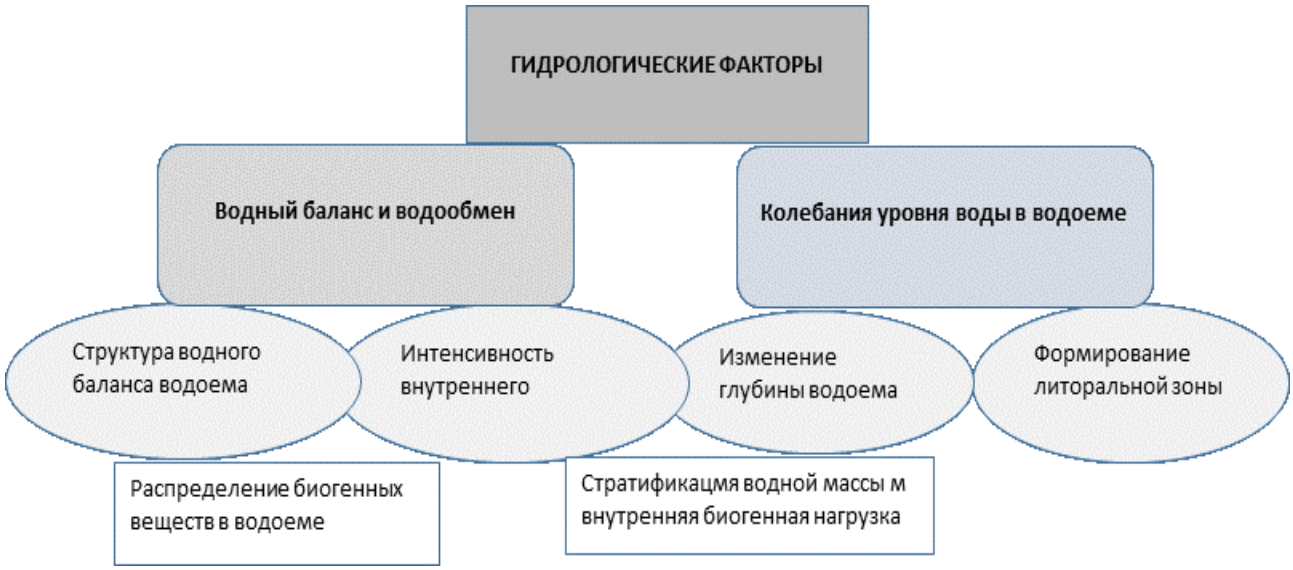

Рис. 1. Схема гидрологических факторов развития фитопланктона.
Fig. 1. Hydrological factors of phytoplankton development.

Также опосредовано действие другого гидрологического фактора – уровень водоема. Свидетельств об увеличении продуктивности при снижении уровня предостаточно, однако механизм этого влияния неочевиден и косвенное влияние понижения уровня водоема на продукционные процессы проявляется по-разному в разных водоемах и при разных режимах регулирования в водохранилищах (Белова, Кременецкая, 2010; Халиуллина и др., 2009; Domitrovich, 2003; Quan Kuimei et al., 2016; Zonary, Ostrovsky, 2011).

Для выявления значимости отдельных гидрологических факторов мы использовали результаты многолетних расчетов биомассы фитопланктона подмосковного Можайского водохранилища. За 60-летний период эксплуатации небольшого стратифицированного водохранилища, осуществляющего многолетнее регулирование стока, рассчитаны связи биомассы с различными гидрологическими характеристиками: объем годового притока воды с водосбора (млн. $м^3$), приток воды за весеннее половодье, объем притока воды дождевых паводков в течение вегетационного периода, коэффициент водообмена водохранилища за период весеннего половодья. Коэффициенты корреляции предсказуемо оказались довольно низкими. Значимые коэффициенты были получены только для связи притока в паводки и биомассы цианобактерий в летний период (Даценко и др., 2017; Эдельштейн и др., 2021).

Среди факторов гидрофизической природы (рис. 2) следует выделить динамику водных масс и термический режим водоема.

Влияние динамических процессов на процессы цветения водоемов неоднозначно. Несомненно, что течения определяют пространственное распределение биомассы

водорослей в водоеме (Новиков, 1978; Быковский, 1984; Рахуба, 2020; Chung et al., 2014). Известно также, что турбулентность во многом определяет приспособленность фитопланктона и сукцессию видов: подвижные виды доминируют в более спокойных условиях, а неподвижные виды – в турбулентных условиях (Barton et al., 2014; Fraisse et al., 2015; Zhang, 2021; Thomas, Gibson, 1990). С ростом интенсивности перемешивания развитие диатомовых водорослей увеличивается, а сине-зеленых – подавляется (Крейман и др., 1992; Bormans, Sherman, 1999; Wilkinson et al., 2016). Тем не менее, отсутствует механистическое понимание влияния турбулентности на миграционное поведение и физиологию фитопланктона, хотя специальными экспериментами и моделированием установлено, что турбулентность является важным фактором, определяющим физиологию фитопланктона, часто приводящим к стрессу и повреждению клеток (Wilkinson et al., 2016). И сравнительно мало работ, посвященных оценке такого важного фактора влияния динамики вод, как изменение скорости оседания фитопланктона, которая обязательно учитывается при моделировании фитопланктона.

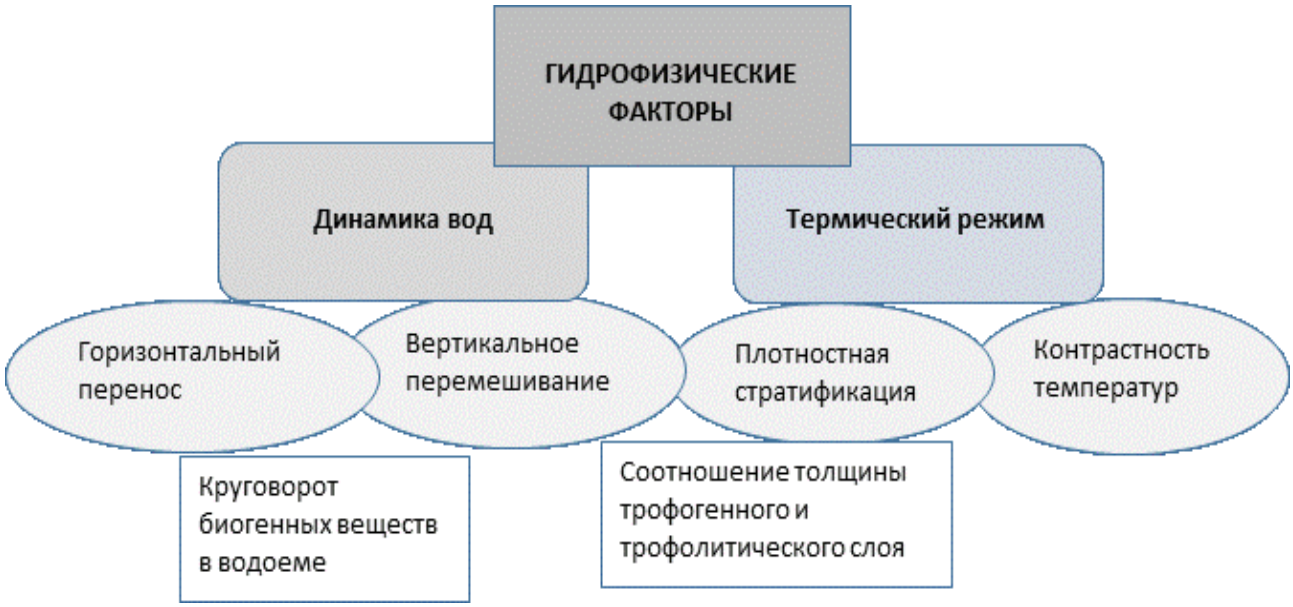

Рис. 2. Схема гидрофизических факторов развития фитопланктона.
Fig. 2. Hydrophysical factors of phytoplankton development.

В число прямых факторов развития фитопланктона традиционно включается температура воды водоема. Тем не менее, результаты многочисленных наблюдений в частности наших многолетних расчетов факторов первичной продукции в Можайском водохранилище приводят к низким коэффициентам корреляции связи биомассы фитопланктона с температурой воды (Даценко и др., 2017). Также слабые связи были отмечены Н. Минеевой (2009) для удельной фотосинтетической активности фитопланктона из-за различной чувствительности к температуре различных видов водорослей и существенной сезонной изменчивости характера этих связей.

По-видимому, для интенсивности первичного продуцирования имеет значение не столько абсолютное значение температуры воды, сколько ее изменчивость во время погодных циклов потепления и похолодания в течение вегетационного периода. Анализ колебаний характеристик продуктивности Можайского водохранилища за летний период вместе с циклами температуры воды показывает заметную внутрисезонную изменчивость

трофических условий (Гончаров и др., 2018). Можно предположить, что одним из факторов колебаний биомассы сине-зеленых водорослей в летне-осенний сезон разных лет может быть частота и контрастность изменчивости погоды в вегетационный сезон. Эту изменчивость можно характеризовать индексом погодной контрастности, который можно представить следующим образом (Эдельштейн и др., 2021).

$$\text{ИПК} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |\Delta T|^i}{[(T_{\text{макс рп}} - T_{\text{нач рп}}) + (T_{\text{макс рп}} - T_{\text{кон рп}})]},$$

где i – номер фазы, n – число температурных фаз, ΔT – диапазон изменения температуры фазы, $T_{\text{макс рп}}$ – максимальная температура воды расчетного периода, $T_{\text{нач рп}}$ и $T_{\text{кон рп}}$ – значения температуры в начале и конце периода.

При нагревании и охлаждении водной толщи водоема в летний период возникает особый режим внутреннего водообмена, который приводит к перемешиванию эпилимниона конвекцией в виде ячеек Бенара (Эдельштейн, 2021). Вода поверхностного слоя опускается до термоклина, что приводит к возникновению в центре такого цилиндра вертикального потока к водной поверхности. Эта ячеистая конвекция является причиной круговорота растворенных и взвешенных веществ внутри эпилимниона, называемого малым гидрохимическим круговоротом (Эдельштейн и др., 2005). В результате этого круговорота из нижних слоев эпилимниона выносится к поверхности растворенный диоксид углерода (CO_2) и минеральные биогенные вещества, образующиеся за счет регенерации погрузившихся органических веществ в процессе их деструкции. Поэтому в первые дни фазы охлаждения возможны резкие увеличения валовой первичной продукции.

Среди гидрохимических факторов первичной продуктивности (рис. 3) доминирует биогенная нагрузка. Из всех публикаций по теме эвтрофирования наибольшее число статей посвящено изучению связям продуктивности водоемов как с концентрациями в водоеме биогенных элементов, главным образом, основных – фосфора и азота, при этом кроме концентраций этих элементов часто рассматривается влияние их соотношения на развитие водорослей (Булгаков, Левич, 1995; Былинкина, 1989; Conley, 2009; Минеева и др., 2021, 2022). Из других биогенных элементов уделяется внимание кремнию (Ходоровская, Стурова, 2002), железу и марганцу и некоторым микроэлементам (Клоченко, Медведь, 1999; Елизарова, 2000).

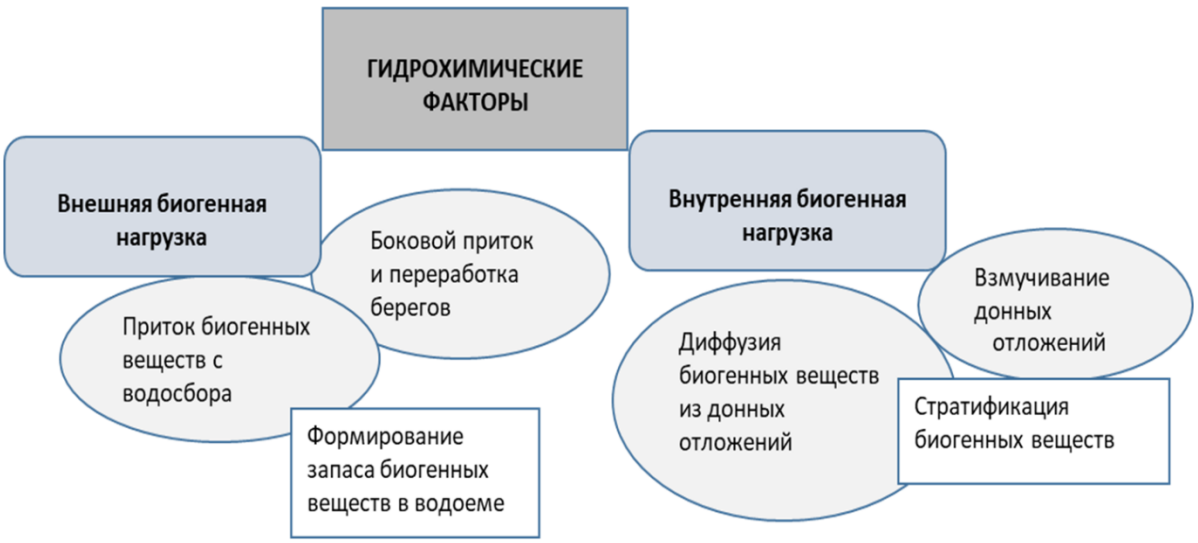

Рис. 3. Схема гидрохимических факторов развития фитопланктона.
Fig. 3. Hydrochemical factors of phytoplankton development.

Если внешняя нагрузка водоема минеральным азотом и фосфором тесно связана с биомассой фитопланктона, то внутренняя влияет на продукционные процессы не так явно (Мартынова, 2010). Поскольку интенсивность выноса биогенов из донных отложений в значительной степени зависит от содержания кислорода в гиполимнионе важнейшее значение в исследованиях продуктивности и процесса эвтрофирования водоемов приобретает анализ режима зон аноксии в водоемах (Эдельштейн и др., 2021; Кременецкая, 2001). Внутренняя нагрузка является функцией с одной стороны внешней нагрузки, с другой – фактора плотностной стратификации.

Вопрос определения типа трофического состояния, несмотря на свою глубокую историю (один из наиболее популярных критериев – индекс Карлсона, предложенный полвека назад), остается неоднозначным. Во-первых, применение индексов и классификаций должно базироваться на осредненной информации за достаточно длительные периоды, чтобы не получалось, что утром водоем олиготрофный, а вечером эвтрофный. При оценке трофического состояния необходимо учитывать чрезвычайно высокую пространственную неравномерность распределения фитопланктона, особенно в периоды интенсивного цветения, когда в водоеме прослеживаются четко выраженные пятна цветения (фото 1).

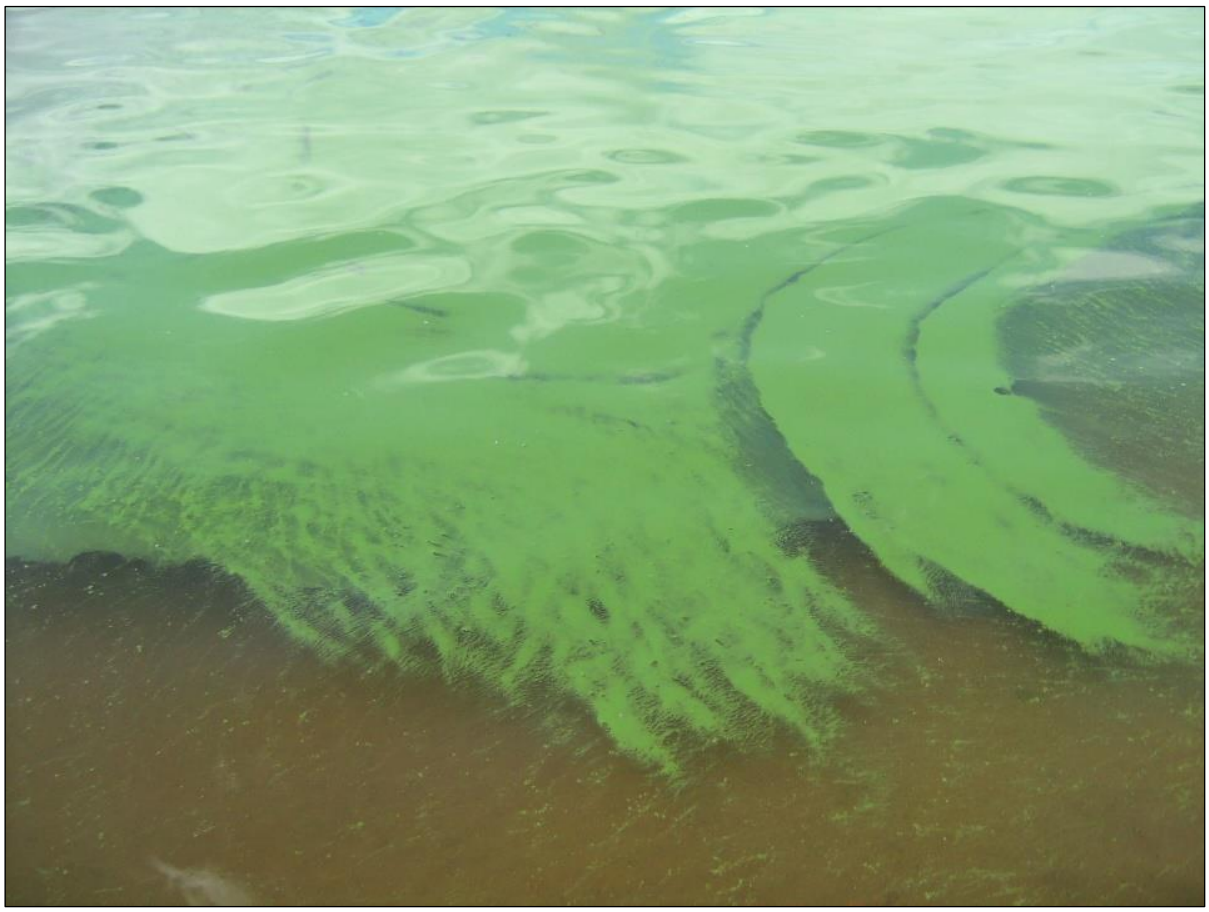

Фото 1. Пятна цветения сине-зеленых водорослей в Можайском водохранилище (здесь и далее – фото автора). **Photo 1.** Patches of blooming Cyanobacteria in the Mozhaisk water reservoir (all photos are taken by the author).

Эта пространственная неравномерность в значительной степени зависит от ветровых нагонов, что может приводить к ситуации, когда какой-нибудь залив водоема при южном

ветре оказывается олиготрофным, а при северном – эвтрофным. Известно, что при нагонном ветре сине-зеленые водоросли могут накапливаться в заливах в виде очень плотных скоплений. Пример такого нагона в Можайском водохранилище приведен на фото 2.

Фото 2. Концентрация сине-зеленых водорослей в заливе Можайского водохранилища.
Photo 2. Concentration of Cyanobacteria in a bay of the Mozhaisk water reservoir.

Кроме того, среди множества предложенных классификаций трофического состояния нередко встречаются противоречия. При оценке трофического состояния двух подмосковных водохранилищ Вазузского и Яузского с использованием более 20 различных классификаций и индексов нами были получены распределения вероятности отнесения к тому или иному типу в широком диапазоне от олиготрофного до эвтрофного. Поэтому такие вероятностные оценки трофического состояния представляются весьма перспективными, также как и поиски новых методов оценки.

Наконец, остается не до конца однозначным вопрос о различиях эвтрофирования озер и водохранилищ. Теоретически продукционные процессы в этих водных объектах подчиняются одним закономерностям, тем не менее, особенности этих процессов легко проявляются при попытках использовать построенную с использованием данных по озерам диаграмму Р. Фолленвейдера (Даценко, 1992). Волжские водохранилища попадают в эвтрофную область диаграмм, хотя по данным многолетних исследований большинство из них относится к мезотрофным водоемам. Причина в том, что в фосфорной нагрузке водохранилищ по сравнению с озерами велика доля нереактивного взвешенного фосфора. Часто этот факт связывают с тем, что водосборы водохранилищ расположены в районах

активной эрозии и притоки богаты терригенным материалом. Это важный фактор, но не единственный, а может быть и не главный. Главный фактор – это наличие в водохранилищах источника терригенной взвеси в виде продуктов переработки берегов, который отсутствует в озерах. Эта взвесь, сорбируя фосфаты, уменьшает концентрации потребляемого ортофосфата и снижает интенсивность первичной продукции.

Наконец, при исследовании эвтрофирования неизменное внимание привлекает вопрос о том, как меняется экосистема при развитии этого процесса и росте уровня трофности водоема. Это можно проследить либо по многолетним изменениям одного водоема, либо путем сравнения различных по уровню трофности водоемов, для которых имеются надежные данные по характеристикам функционирования экосистемы.

С использованием первого подхода нами была установлена хотя и слабая, но достаточно четко выраженная тенденция снижения коэффициента П/Б за 61-летний период эксплуатации Можайского водохранилища при многократно проиллюстрированном росте его эвтрофирования (Гидроэкологический …, 2015). Эта тенденция соответствует тому, что экосистема стремится к такому состоянию, когда на единицу доступной энергии приходится максимум биомассы. Соответственно с ростом трофии уменьшаются значения суточных ассимиляционных чисел (Даценко, Пуклаков, 2024). Для волжских водохранилищ такие же выводы получены Н. Минеевой (2009) по характеристикам продукционных процессов в зависимости от уровня трофии, определенному по Индексу трофического состояния.

В данном обзоре затронуты лишь некоторые вопросы сложной проблемы эвтрофирования. На самом деле как в понимании механизма этого явления, так и в моделировании остается немало нерешенных и спорных вопросов, решение которых несомненно поможет обеспечить в разработке эффективного метода прогноза цветения пресноводных водоемов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания кафедры гидрологии суши Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений в гидрологических системах, водных ресурсах и качестве поверхностных вод» (I.10, ЦИТИС 121051400038-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов А.И.* 2000. Математическое моделирование популяционной динамики с учетом адаптивного поведения особей // Журнал общей биологии. Т. 60. № 2. С. 145-156.
2. *Белова С.Л., Кременецкая Е.Р.* 2010. О влиянии колебаний уровня воды на продукционно-деструкционные процессы в Можайском водохранилище // Водные ресурсы. Т. 37. № 6. С. 682-691.
3. *Быковский В.И.* 1984. Характеристики движения воды и размножение водорослей // Гидробиологический журнал. Т. 20.

REFERENCES

1. Abakumov AI. Mathematical modeling of population dynamics taking into account the adaptive behavior of individuals [Matematicheskoye modelirovaniye populyatsionnoy dinamiki s uchetom adaptivnogo povedeniya osobey]. *Journal of General Biology [Zhurnal obshchey biologii]*. 2000;61 (2):145-156.
2. Belova SL, Kremenetskaya ER. On the influence of water level fluctuations on production-destruction processes in the Mozhaisk Reservoir [O vliyanii kolebaniy urovnya vody na produktsionno-destruktsionnyye protsessy v Mozhayskom vodohranilishche]. *Water Resources [Vodnyye resursy]*. 2010;37 (6):682-691.
3. Bykovsky VI. Characteristics of water movement

№ 4. С. 39-44.
4. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) 2015. М.: Перо. 286 с.
5. *Гончаров А.В., Гречушникова М.Г., Пуклаков В.В.* 2018. Новые возможности классического метода: автоматизированное определение первичной продукции и деструкции органического вещества в водоеме // Биология внутренних вод. № 4. С. 107-110
6. *Даценко Ю.С.* 2007. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: Геос. 252 с.
7. *Даценко Ю.С., Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К.* 2017. Анализ влияния абиотических факторов на развитие фитопланктона в малопроточном стратифицированном водохранилище // Труды Карельского научного центра РАН. № 10. С. 75-85.
8. *Даценко Ю.С., Пуклаков В.В.* 2020. Прогноз развития фитопланктона в проектируемом низконапорном водохранилище на р. Дон // Водные ресурсы. № 1. С. 57-67.
9. *Кожова О.М.* 1975. Водообмен и интенсивность вегетации фитопланктона Братского водохранилища // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск. С.75-78.
10. *Корнева Л.Г. 2015.* Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатной дом. 283 с.
11. *Крейман К.Д., Голосов С.Д., Сковородова Е.П.* 1992. Влияние турбулентного перемешивания на фитопланктон // Водные ресурсы. №3. с.92-97.
12. *Леонов А.В., Пищальник В.М.* 2012. Моделирование природных процессов в водной среде.

and algae reproduction [Kharakteristiki dvizheniya vody i razmnozheniye vodorosley]. *Hydrobiological Journal [Gidrobiologicheskiy zhurnal]*. 1984;20 (4):39-44.
4. Hydroecological regime of reservoirs in the Moscow region (observations, diagnosis, and forecast) [*Gidroekologicheskiy rezhim vodokhranilishch Podmoskov'ya (nablyudeniya, diagnoz, prognoz*]. Moscow, 2015:286.
5. Goncharov AV, Grechushnikova MG, Puklakov VV. New possibilities of the classical method: automated determination of primary production and destruction of organic matter in a reservoir [Novyye vozmozhnosti klassicheskogo metoda: avtomatizirovannoye opredeleniye pervichnoy produktsii i destruktsii organicheskogo veshchestva v vodoyeme]. *Biology of Inland Waters [Biologiya vnutrennikh vod]*. 2018;4:107-110
6. Datsenko YS. Eutrophications of reservoirs [*Evtrofirovaniye vodokhranilishch*] Hydrological and hydrochemical aspects [*Gidrologo-gidrokhimicheskiye aspekty*]. Moscow: GEOS, 2007:252.
7. Datsenko YS, Puklakov VV, Edelshtein KK. Analysis of the influence of abiotic factors on the development of phytoplankton in a low-flow stratified reservoir [Analiz vliyaniya abioticheskikh faktorov na razvitiye fitoplanktona v maloprotochnom stratifitsirovannom vodokhranilishche]. *Proc. of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* [Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN] 2017;10:75-85.
8. Datsenko YS, Puklakov VV. Forecast of phytoplankton development in the projected low-head reservoir on the Don River [Prognoz razvitiya fitoplanktona v proyektiruyemom nizkonapornom vodokhranilishche na r. Don]. *Water Resources [Vodnyye resursy]*. 2007;1:57-67.
9. Kozhova OV. Water exchange and the intensity of phytoplankton vegetation in the Bratsk Reservoir [*Vodoobmen i intensivnost' vegetatsii fitoplanktona Bratskogo vodokhranilishcha*] *The circulation of matter and energy in lake reservoirs [Krugovorot veshchestva i energii v ozernykh vodoyemakh]*. Novosibirsk, 1975:75-78.
10. Korneva LG. Phytoplankton of reservoirs of the Volga basin [Fitoplankton vodokhranilishch

Теоретические основы. Южно-Сахалинск. 227с.

13. *Меншуткин В.В.* 2010. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск-СПб. 414 с.
14. *Минеева Н.М.* 2009. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус. 278 с.
15. *Минеева Н.М., Поддубный С.А., Степанова И.Э., Цветков А.И.* 2022. Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона водохранилищ Средней Волги // Биология внутренних вод. № 6. С. 640-651.
16. *Минеева Н.М., Степанова И.Э., Семадени И.В.* 2021. Биогенные элементы и их роль в развитии фитопланктона водохранилищ Верхней Волги // Биология внутренних вод. № 1. С. 24-34.
17. *Мусатов А.П.* 1981. Антропогенное эвтрофирование водоемов // Водные ресурсы. № 3. № 3. С. 105-118.
18. *Науменко М.А.* 2007. Эвтрофирование озер и водохранилищ. СПб. 97 с.
19. *Никитин О.В., Латыпова В.З.* 2014. Экотехнологии восстановления водных объектов (конспект лекций) [Электронный ресурс https://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/21987 (дата обращения 03.04.2025)].
20. *Новиков Б.И.* 1978. Некоторые данные о влиянии ветрового режима на распределение сине-зеленых водорослей в водохранилищах // Биология внутренних вод. № 40. С. 54-55.
21. *Попов А.Н., Оболдина Г.А., Прохорова Н.Б.* 2017. Концептуальные основы реабилитации поверхностных водных объектов // Водное

basseyna Volgi]. Kostroma: Kostromskoy pechatnyy dom, 2015:283.

11. Kreyman KD, Golosov SD, Skovorodova EP. The influence of turbulent mixing on phytoplankton [Vliyaniye turbulentnogo peremeshivaniya na fitoplankton]. *Water Resources [Vodnyye resursy]*. 1992;3:92-97.
12. Leonov FV, Pischalnik VM. Modeling of natural processes in the aquatic environment [Modelirovaniye prirodnykh protsessov v vodnoy srede] Theoretical foundations. [Teoreticheskiye osnovy]. Yuzhno-Sakhalinsk, 2012:227.
13. Menshutkin V.V. The art of modeling (ecology, physiology, evolution) [Iskusstvo modelirovaniya (ekologiya, fiziologiya, evolyutsiya)]. Petrozavodsk, Saint-Petersburg, 2010:414.
14. Mineeva NM. The primary production of plankton in the reservoirs of the Volga [*Pervichnaya produktsiya planktona v vodokhranilishchakh Volgi*]. Yaroslavl: Printhaus, 2009:79.
15. Mineeva NM, Poddubny SA, Stepanova IE, Tsvetkov AI. Abiotic factors and their role in the development of phytoplankton of reservoirs of the Middle Volga [Abioticheskiye faktory i ikh rol’ v razvitii fitoplanktona vodokhranilishch Sredney Volgi]. *Biology of Inland Waters [Biologiya vnutrennikh vod]*. 2022;6:640-651.
16. Mineeva NM, Stepanova IE, Semadeni IV. Biogenic elements and their role in the development of phytoplankton in Upper Volga reservoirs [Biogennyye elementy i ikh rol' v razvitii fitoplanktona vodokhranilishch Verkhney Volgi]. *Biology of Inland Waters [Biologiya vnutrennikh vod]*. 2021;1:24-34.
17. Musatov AP. Anthropogenic Eutrophication of Water Bodies [Antropogennoye evtrofirovaniye vodoyemov]. 1981. *Water Resources [Vodnyye resursy]*. 1981;3:105-118.
18. Naumenko MA. Eutrophication of lakes and reservoirs [Evtrofirovaniye ozer i vodokhranilishch]. Saint-Petersburg, 2007:97.
19. Nikitin OV, Latypova VZ. Ecotechnologies for the restoration of water bodies [Ekotekhnologii vosstanovleniya vodnykh ob”yektov (konspekt lektsiy)]. 2014, Available at

хозяйство России. № 4. С. 5-17.
22. *Рахуба А.В.* 2020. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // Ученые записки Казанского университета. Серия «Естественные науки». Т. 162. Кн. 3. С. 430-444.
23. *Сухаревич В.И., Полак Ю.М.* 2020. Глобальное распространение цианобактерий: причины и последствия (обзор) // Биология внутренних вод. № 6. С. 562-572.
24. *Халиуллина Л.Ю., Яковлев В.А., Халиуллин И.И.* 2009. Сезонная и межгодовая динамика фитопланктона в связи с уровенным режимом Куйбышевского водохранилища // Водные ресурсы. № 4. С. 481-487.
25. *Шпет Г.И., Кубышкин Г.П.* 1984. О зависимости «цветения» воды от интенсивности водообмена // Гидробиологический журнал. Т. 4. № 5. С. 55-57
26. *Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С., Пуклаков В.В.* 2021. Цветение водохранилища многолетнего регулирования стока // Водные ресурсы. Т. 48. № 2. С. 164-172.
27. *Эдельштейн К.К., Ершова М.Г., Заславская М.Б.* 2005. Биохемогенный кальцит важный компонент круговорота веществ в эвтрофном Можайском водохранилище // Водные ресурсы. № 4. С. 477-488.
28. *Barton A.D., Ward B.A., Williams R.G., Follows M.J.* 2014. The Impact of Fine-Scale Turbulence on Phytoplankton Community Structure // Limnology and Oceanography: Fluids and Environments. Vol. 4. P. 34-49.
29. *Bormans M.B.S., Sherman I.T.* 1999. Is Buoyancy Regulation in Cyanobacteria an Adaptation to Exploit Separation of Light and Nutrients? // Marine and Freshwater https://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/21987 (Date of Access 03/04/2025).
20. Novikov BI. Some data on the influence of wind regime on the distribution of blue-green algae in reservoirs [Nekotoryye dannyye o vliyanii vetrovogo rezhima na raspredeleniye sinezelenykh vodorosley v vodokhranilishchakh]. *Biology of Inland Waters [Biologiya vnutrennikh vod]*. 1978;40:54-55.
21. Popov AN, Oboldina GA, Prokhorova NB. Conceptual foundations for the rehabilitation of surface water bodies [Kontseptual'nyye osnovy reabilitatsii poverkhnostnykh vodnykh ob"yektov]. *Russian Water Industry [Kontseptual'nyye osnovy reabilitatsii poverkhnostnykh vodnykh ob"yektov]*. 2017;4:5-17.
22. Rahuba AV. Assessment of the impact of the hydrodynamic regime on the development of phytoplankton and the water quality of the Kuibyshev Reservoir [Otsenka vliyaniya gidrodinamicheskogo rezhima na razvitiye fitoplanktona i kachestvo vody Kuybyshevskogo vodokhranilishcha]. *Scientific Notes of Kazan University [Uchenyye zapiski Kazanskogo universiteta] Series "Natural Sciences" [Seriya "Estestvennye nauki"]*. 2020;162 (3):430-444.
23. Suharevich VI, Polak UM. Global distribution of cyanobacteria: causes and consequences (review) [Global'noye rasprostraneniye tsianobakteriy: prichiny i posledstviya (obzor)]. *Biology of Inland Waters [Biologiya vnutrennikh vod]*. 2020;6:562-572.
24. Khaliullina LYu, Yakovlev VA, Khaliullin II. Seasonal and interannual dynamics of phytoplankton in connection with the level regime of the Kuibyshev Reservoir [Sezonnaya i mezhgodovaya dinamika fitoplanktona v svyazi s urovennym rezhimom Kuybyshevskogo vodokhranilishcha]. *Water Resources [Vodnyye resursy]*. 2009. 4:481-487.
25. Shpet GI, Kubyshkin GP. On the dependence of water "bloom" on the intensity of water exchange [O zavisimosti "tsveteniya" vody ot intensivnosti vodoobmena]. *Hydrobiological Journal [Gidrobiologicheskiy zhurnal]*. 1984;4 (5):55-57.
26. Edelstein KK, Datsenko YuS, Puklakov VV. Bloom of a reservoir with long-term flow regulation [Tsveteniye vodokhranilishcha

Research. Vol. 50. P. 897-906.
30. *Chung S.W., Imberger J., Hypsey M.R., Lee H.S.* 2014. The Influence of Physical and Physiological Processes on the Spatial Heterogeneity of a Microcystis Bloom in Stratified Reservoir // Ecological Modelling. Vol. 289. P. 133-149.
31. *Dickman M.* 1969. Some Effects of Lake Renewal on Phytoplankton Productivity and Species Composition // Limnology and Oceanography. Vol. 14. P. 660-666.
32. *Domitrovich Y.Z.* 2003. Effect in Fluctuation in Water Level on Phytoplankton Development in Three Lakes on the Parana River Floodplain (Argentina) // Hydrobiologia. Vol. 510. P. 175-193.
33. Quan Kuimei, Liu Xia, Chen Yuwei. 2016. Effects of Water Level Fluctuation on Phytoplankton Succession in Poyang Lake, China // Ecohydrology and Hydrobiology. Vol. 16. P. 175-184.
34. *Fraisse S., Bormans M., Lagadeuc Y.* 2015. Turbulence Effects on Phytoplankton Morphofunctional Traits Selection: Functional Traits Selected by Turbulence // Limnology and Oceanography. Vol. 60. P. 872-884.
35. *Rast W., Lee G.F.* 1978. Summary Analysis of the North American (U.S. Portion) OECD Eutrophication Project: Nutrient-Loading Lake Response Relationships and Trophic State Indices // Ecological Research Series. Corvallis, Oregon: Corvallis Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, Environmental Protection Agency. 455 p.
36. *Reckhow K.H.* 1979. Empirical Lake Models for Phosphorus: Development, Applications, Limitations and Uncertainty // Perspectives on Lake Ecosystem

mnogoletnego regulirovaniya stoka]. *Water Resources [Vodnyye resursy]*. 2021;48 (2):164-172.
27. Edelstein KK, Ershova MG, Zaslavskaya MB. Biochemogenic calcite is an important component of the cycle of substances in the eutrophic Mozhaisk Reservoir [Biokhemogennyy kal'tsit vazhnyy komponent krugovorota veshchestv v evtrofnom Mozhayskom vodokhranilishche]. *Water Resources [Vodnyye resursy]*. 2005. 4:477-488.
28. Barton AD, Ward BA, Williams RG, Follows MJ. The Impact of Fine-Scale Turbulence on Phytoplankton Community Structure. *Limnology and Oceanography*. 2014;4:34-49.
29. Bormans MBS, Sherman IT. Is Buoyancy Regulation in Cyanobacteria an Adaptation to Exploit Separation of Light and Nutrients? *Marine and Freshwater Research.* 1999;50:897-906.
30. Chung SW, Imberger J, Hypsey MR, Lee HS. The Influence of Physical and Physiological Processes on the Spatial Heterogeneity of a Microcystis Bloom in Stratified Reservoir. *Ecological Modelling.* 2014;289:133-149
31. Dickman M. Some effects of lake renewal on phytoplankton productivity and species composition. *Limnology and Oceanography*. 1969:660-666.
32. Domitrovich YZ. Effect in Fluctuation in Water Level on Phytoplankton Development in Three Lakes on the Parana River Floodplain (Argentina). *Hydrobiologia.* 2003;510:175-193.
33. Quan Kuimei, Liu Xia, Chen Yuwei. Effects of Water Level Fluctuation on Phytoplankton Succession in Poyang Lake, China. *Ecohydrology and Hydrobiology.* 2016;16:175-184.
34. Fraisse S, Bormans M, Lagadeuc Y. Turbulence Effects on Phytoplankton Morphofunctional Traits Selection: Functional Traits Selected by Turbulence. *Limnology and Oceanography.* 2015;60:872-884.
35. Rast W, Lee GF. Summary Analysis of the North American (U.S. Portion) OECD Eutrophication Project: Nutrient-Loading Lake Response Relationships and Trophic State Indices. *Ecological Research Series. EPA.* Corvallis, Oregon: Corvallis Environmental Research

Modeling. Ann Arbor Science Publishers. P. 193-221.
37. *Thomas W.H., Gibson C.H.* 1990. Quantified Small-Scale Turbulence Inhibits a Red Tide Dinoflagellate, Gonyaulax polyedra Stein // Nature. Vol. 1. No. 2. P. 27-37.
38. *Vollenwaider R.A.* 1975. Input-output Models with Special Reference to the Phosphorus Loading Concept in Limnology // Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie. Vol. 37. P. 53-84.
39. *Walker W.W.* 1982. An Empirical Analysis of Phosphorus, Nitrogen and Turbidity Effects on Reservoir Chlorophyll-a Levels // Canadian Water Resources Journal. Vol. 7 (1). P. 88-107.
40. *Welch E.B., Patmont C.R.* 1980. Lake Restoration by Dilution: Moses Lake, Washington // Water Research. Vol. 14. P. 34-45.
41. *Wilkinson A., Hondzo M., Guala M.* 2016. Effect of Small-Scale Turbulence on the Growth and Metabolism of Microcystis aeruginosa // Advances in Microbiology. No. 6. P. 351-367.
42. *Zhang H, Cui Y, Zhang Y, Xu H*. 2021. Experimental Study of the Quantitative Impact of Flow Turbulence on Algal Growth. *Water*. 13 (5):659-668
43. *Zonary N., Ostrovsky I.* 2011. Ecological Impacts of Excessive Water Level Fluctuations in Stratified Freshwater Lakes // Inland Water. No. 1. P. 47-59.

Laboratory, Office of Research and Development, Environmental Protection Agency, 1978:455.
36. Reckhow KH. Empirical Lake Models for Phosphorus: Development, Applications, Limitations and Uncertainty. *Perspectives on Lake Ecosystem Modeling*. Ann Arbor Science Publishers, 1979:193-221.
37. Thomas WH, Gibson CH. Quantified Small-Scale Turbulence Inhibits a Red Tide Dinoflagellate, Gonyaulax polyedra Stein. *Nature.* 1990;1 (2):27-37.
38. Vollenwaider RA. Input-output Models with Special Reference to the Phosphorus Loading Concept in Limnology. *Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie.* 1975;37:53-84.
39. Walker WW. An Empirical Analysis of Phosphorus, Nitrogen and Turbidity Effects on Reservoir Chlorophyll-a Levels. *Canadian Water Resources Journal.* 1982;7 (1):88-107.
40. Welch EB, Patmont CR. Lake Restoration by Dilution: Moses Lake, Washington. *Water Research.* 1980;14:34-45.
41. Wilkinson A, Hondzo M, Guala M. Effect of Small-Scale Turbulence on the Growth and Metabolism of Microcystis aeruginosa. *Advances in Microbiology.* 2016;6:351-367.
42. Zhang H, Cui Y, Zhang Y, Xu H. Experimental Study of the Quantitative Impact of Flow Turbulence on Algal Growth. *Water.* 2021;13 (5):659-668
43. Zonary N, Ostrovsky I. Ecological Ecological Impacts of Excessive Water Level Fluctuations in Stratified Freshwater Lakes. *Inland Water.* 2011:47-59.

UDC 574.51

A REVIEW OF SOME PROBLEMS REGARDING THE RESEARCH OF EUTROPHICATION OF FRESHWATER RESERVOIRS

© 2025. Y. Datsenko

Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia. E-mail: yuri0548@mail.ru, datsenko_nina@mail.ru

Received April 19, 2025. Revised May 01, 2025. Accepted June 01, 2025.

In this article we analyze the modern view on the effect that abiotic factors (hydrological, hydrophysical, hydrochemical) have on the primary productivity of water reservoirs, and the differences in the development of the eutrophication process in lakes and reservoirs, as well as the problems associated with assessing the trophic status of reservoirs. Using the results of model calculations performed for the Mozhaisk Reservoir, we show the features of the trend of changes in the state of the reservoir ecosystem.

Funding. This work was carried out as part of the state task for the Department of Land Hydrology of Moscow State University “Analysis, Modeling and Forecasting of Changes in Hydrological Systems, Water Resources and Quality of Surface Water” (I.10, TsITIS No. 121051400038-1)
Keywords: eutrophication, primary productivity, abiotic factors, reservoirs.
DOI: 10.24412/2542-2006-2025-2-131-144
EDN: ZZQFIN