

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
Кафедра экологии и зоологии

С. И. Сиделев
А. А. Зубишина
О.В. Бабаназарова

**Водные экосистемы
(функционирование,
антропогенные изменения,
восстановление)**

Учебно-методическое пособие

Ярославль
ЯрГУ
2016

УДК 577.356(072)
ББК Е082я73
С34

*Рекомендовано
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2016 года*

Рецензент
кафедра экологии и зоологии ЯрГУ им. П. Г. Демидова

Сиделев, Сергей Иванович.

С34 Водные экосистемы (функционирование, антропогенные изменения, восстановление) : учебно-методическое пособие / С. И. Сиделев, А. А. Зубишина, О. В. Бабаназарова ; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. — Ярославль : ЯрГУ, 2016. — 56 с.

Учебно-методическое пособие содержит оригинальные методические разработки к проведению практических, лабораторных и семинарских занятий по следующим темам: антропогенное эвтрофирование водоемов, трофическая структура водных экосистем и восстановление водоемов.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Биоразнообразие водных экосистем, их функционирование, охрана и восстановление», «Антропогенные изменения водных экосистем и методы их восстановления», «Избранные главы гидроэкологии», «Гидробиология».

УДК 577.356(072)
ББК Е082я73

© ЯрГУ, 2016

Тема 1. Эвтрофирование водоемов: причины и последствия. Концепция биогенной нагрузки.

Лекции по теме посвящены одной из самых актуальных и широко известных проблем антропогенных изменений водных экосистем — антропогенному эвтрофированию. В лекциях даются определения основных понятий, связанных с проблемой антропогенного эвтрофирования: трофический тип водоема, естественное и антропогенное эвтрофирование, деэвтрофирование, биогенная нагрузка на водоем. Студенты должны усвоить отличия по ряду качественных и количественных параметров между олиготрофными, мезотрофными, эвтрофными и дистрофными водоемами, причины, этапы и последствия антропогенного эвтрофирования водных экосистем, классификации показателей эвтрофирования, их преимуществ и недостатков при оценке трофического состояния водоемов, особенности применения индексов трофического состояния. Кроме того, студенты знакомятся с одной из практических стратегий по борьбе с антропогенным эвтрофированием, заключающейся в снижении биогенной (фосфорной) нагрузки на водоем, для этой цели используется модель Р. Фолленвайдера. Полученные теоретические знания будут необходимы и достаточны для успешного решения заданий на практических занятиях и закрепления соответствующих компетенций по дисциплинам «Биоразнообразие водных экосистем, их функционирование, охрана и восстановление», «Антропогенные изменения водных экосистем и методы их восстановления», «Избранные главы гидроэкологии», «Гидробиология».

Ключевые слова

Трофический тип водоема; олиготрофные, мезотрофные, эвтрофные и дистрофные водоемы; естественное и антропогенное эвтрофирование; деэвтрофирование (реолиготрофизация); отношение Редфилда; биогенная нагрузка (внешняя и внутренняя); фосфор; азот; углерод; индекс трофического состояния; диаграмма Р. Фолленвайдера.

Содержание практических занятий

Практические занятия по данной теме проводятся в форме семинаров, на которых студенты при участии преподавателя обсуждают выбранные для дискуссии вопросы, представленные ниже в виде отдельных заданий. Кроме того, занятия включают и решение расчетных задач.

Задание 1. При знакомстве с трофической классификацией водоемов всегда возникает сомнение в целесообразности выделения так называемых дистрофных водоемов, которые по продуктивности очень похожи на олиготрофные. Прочитайте статью В. В. Бульона на эту тему:

Бульон В. В. О дистрофном типе озер и классификации водоемов // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 3. С. 271–274 —

и ответьте на следующие вопросы:

Какие критерии положены в основу классификаций озер по степени их трофности, гумифицированности и кислотности? Поясните, почему у автора статьи вызывает сомнение корректность оценки уровня трофности озер по концентрации общего фосфора? Согласны ли вы с мнением В. В. Бульона, что дистрофия не является трофической категорией? Приведите аргументы в пользу этой точки зрения. Каким термином предлагается заменить понятие «дистрофный водоем»?

Задание 2. Изучая озеро, какие статистические связи по направлению (положительную корреляцию или отрицательную корреляцию) вы ожидаете обнаружить:

а) между биомассой фитопланктона и концентрацией хлорофилла «а» в воде;

б) концентрацией хлорофилла «а» и содержанием общего фосфора в воде;

в) прозрачностью воды по диску Секки и концентрацией хлорофилла «а» в воде;

г) биомассой диатомовых водорослей и концентрацией растворенного в воде кремния;

д) концентрацией минерального фосфора в воде и концентрацией хлорофилла «а»;

- е) биомассой фитопланктона и биомассой бактериопланктона;
 - ж) биомассой бактериопланктона и биомассой зоопланктона;
 - з) концентрацией минерального фосфора в воде и биомассой бактериопланктона
 - и) биомассой фитопланктона и степенью зарастания водоема макрофитами;
 - к) прозрачностью воды по диску Секки и степенью зарастания водоема рдестами;
 - л) содержанием кислорода в воде озера и биомассой фитопланктона;
 - м) биомассой бактериопланктона и концентрацией углекислого газа в воде озера;
 - н) концентрацией хлорофилла «а» в воде и рН воды;
 - о) концентрацией минерального азота в воде и биомассой гетеротичных азотфиксирующих цианобактерий;
 - п) биомассой зообентоса и биомассой фитопланктона?
- Ответы объясните.

Задание 3. Подумайте, в каких случаях исследователь, собрав фактические данные, может не установить статистической связи между парами показателей, перечисленных в задании 2.

Задание 4. Почему связь между общим фосфором и концентрацией хлорофилла «а» в озерах менее вариабельна (более строгая), нежели в реках?

Задание 5. Прочитайте статьи:

1. Бульон В. В. Имеет ли место естественное эвтрофирование озер? // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 6. С. 759–764.

2. Даценко Ю. С. О статье В. В. Бульона «Имеет ли место естественное эвтрофирование озер?» // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 6. С. 765–766.

3. Anderson N. J. Naturally eutrophic lakes: reality, myth or myopia? // Trends in Ecology and Evolution. 1995. № 10. P. 137–138 —

и проведите дискуссию по следующим вопросам:

Согласны ли вы с мнением, что водные экосистемы постепенно изменяются в сторону перехода от олиготрофного состояния в эвтрофное? Возможен ли обратный природный процесс? Являет-

ся ли внутренняя биогенная нагрузка самостоятельным фактором эвтрофирования озер? Какие данные не согласуются с представлением о существовании естественного эвтрофирования? По каким причинам в некоторых регионах могут существовать озера с «природными» цианобактериальными цветениями? С цветением воды азотфиксирующими цианобактериями?

Задание 6. Какая форма фосфора адекватнее будет отражать трофический статус водоема — общий фосфор или минеральный фосфор, почему?

Задание 7. Рассчитайте индекс трофического состояния (по В. В. Бульону) для озер с использованием данных по среднегодовой концентрации хлорофилла «а», общего фосфора и прозрачности воды (Бульон, 1997):

$$\text{ИТС}_{\text{Chl}} = 40 + 20 \cdot \lg \text{Chl}$$

$$\text{ИТС}_{\text{ТР}} = 18 + 29 \cdot \lg \text{ТР}$$

$$\text{ИТС}_S = 75 - 46 \cdot \lg S,$$

где Chl — концентрация хлорофилла «а», мкг/л;

ТР — концентрация общего фосфора, мкг/л;

S — прозрачность воды по диску Секки, м.

Градация трофности водоемов по ИТС: от 0 до 20 — ультраолиготрофные, от 20 до 40 — олиготрофные, от 40 до 60 — мезотрофные, от 60 до 80 — эвтрофные, от 80 до 100 — гиперэвтрофные.

Озеро	Хлорофилл «а», мкг/л (Chl)	Общий фосфор, мг/л (ТР)	Прозрачность по диску Секки, м (S)
Плещеево	2.0	0.04	4
Рюмниково	6.6	0.015	1
Неро	100	0.13	0.4
Искробол	199	0.33	0.3

1. Определите трофический статус озер на основе полученных индексов.

2. Часто расчет ИТС по разным показателям дает различающиеся результаты и один и тот же водоем по одному из показателей можно классифицировать, например, как эвтрофный, а по другому — как мезотрофный. Столкнулись ли вы с подобной ситуацией при расчете ИТС для данных озер? Если да, то подумайте, каким образом можно объяснить несоответствие между оценками трофического статуса по разным показателям?

Задание 8. Case-study: Эвтрофирование озера Вашингтон (США). Прочитайте следующие разделы книги: Эдмондсон Т. Практика экологии. Об озере Вашингтон и не только о нём. М.: Мир, 1998.

1. Эвтрофикация и восстановление озера Вашингтон (с. 16–29).
2. Реакция общественности (с. 29–44).
3. Эпоха дафнии (с. 44–52).
4. Уруть (с. 52–55).
5. Нынешнее состояние озера Вашингтон, Выводы (с. 57–61) — и ответьте на вопросы:

1. Какой из методов борьбы с эвтрофированием был применен для озера Вашингтон с целью улучшения его экологического состояния и снижения цветения воды цианобактериями? В чем вы видите недостатки использованной технологии контроля за антропогенным эвтрофированием?

2. Как Т. Эдмондсон объясняет произошедшие изменения в соотношении азота и фосфора в озерной воде после проведения восстановительных мероприятий? Изменяло ли это роль этих биогенных элементов в лимитировании развития фитопланктона в озере? Ответ обоснуйте, проанализировав рис. 1.6 из книги.

3. Какие выводы вы можете сделать, прочитав главу «Реакция общественности»? С какими сложностями и конфликтами интересов можно столкнуться при реализации экологических проектов по контролю за эвтрофированием водоемов?

4. Что случилось с озером Вашингтон в 1976 г.? Расскажите о механизмах, предложенных Т. Эдмондсон для объяснения тех непредвиденных изменений, которые произошли с озером с 1976 г.? Попытайтесь отобразить как можно подробнее произошедшие изменения в озере Вашингтон в виде блок-схемы.

5. Как Т. Эдмондсон объяснил резкое возрастание количества урути в озере Вашингтон? Согласны ли вы с его точкой зрения? Как можно экспериментально доказать точку зрения Т. Эдмондсона о появлении урути в озере? Какова положительная и отрицательная роль макрофитов для хозяйственной деятельности человека и экологического состояния водоемов? Какие меры борьбы с распространением урути в озере были предприняты?

6. Законспектируйте тезисно наиболее важные, с вашей точки зрения, выводы, которые можно сделать из истории реализации проекта по контролю за эвтрофированием озера Вашингтон. Какие уроки из этого нужно извлечь при реализации аналогичных проектов на других водоемах?

Задание 9. Применение диаграммы Р. Фолленвайдера с целью контроля антропогенного эвтрофирования (рис. 1).

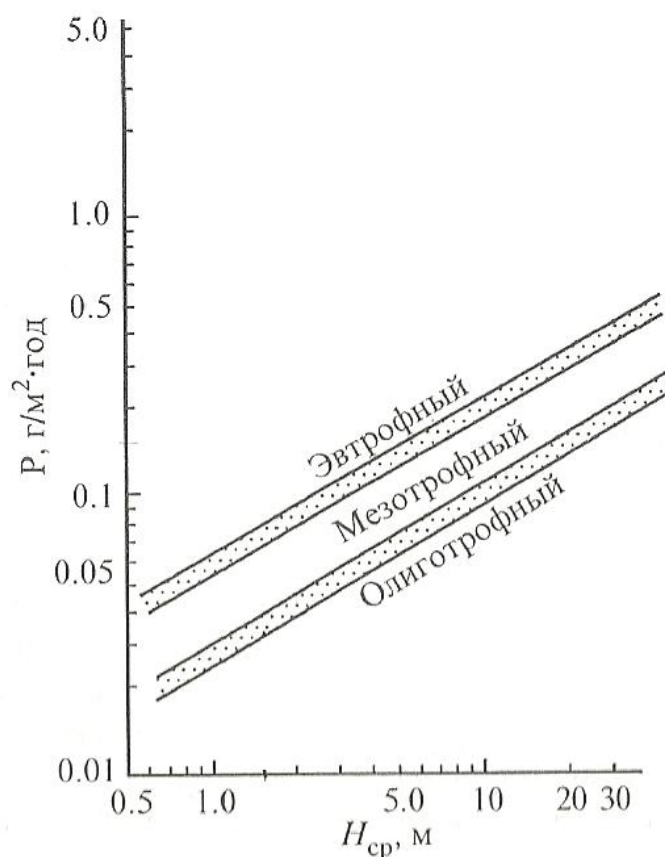


Рис. 1. Диаграмма Р. Фолленвайдера:
по оси абсцисс — средняя глубина в метрах ($H_{\text{ср}}$),
по оси ординат — годовая нагрузка общего фосфора (P)
(рисунок взят из кн.: Прыткова, 2002 с изменениями)

1. Некое озеро долгие годы подвергалось антропогенному эвтрофированию, при средней глубине около 5 м текущая общая фосфорная нагрузка составляет $1 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$. Было принято решение по контролю за экологическим состоянием озера с целью снижения его трофического статуса до мезотрофного состояния. Как предполагается, это может улучшить качество воды и привести к увеличению её прозрачности, что сможет привлечь большее число туристов в данный регион. Многие стороны заинтересованы в осуществлении данного проекта, в частности местные жители, ученые-экологи, региональные власти, коммерческие экологические организации, туристические компании. Экологами были проведены предварительные научные исследования по экологической эффективности возможных мероприятий по борьбе с эвтрофированием. По итогам работы было оценено изменение общей фосфорной нагрузки на озеро: если увеличить проточность озера, то фосфорная нагрузка на озеро снизится на $(0.1 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год})$, полное удаление донных отложений ($0.7 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$), контроль за точечными источниками фосфора на водосборе ($0.2 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$), создание защитных водоохраных зон по берегам озера ($0.1 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$), ежегодное изъятие макрофитов из водоема ($0.15 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$), добавление в воду озера карбоната кальция для химического связывания фосфора ($0.6 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$), монтирование установок для аэрации воды ($0.3 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$). На общественных слушаниях возникли горячие споры. Общественность и туристические компании настаивают на углублении озера путем изъятия донных отложений, что будет способствовать рекреационному использованию озера, приведет к увеличению рыбных запасов и использованию маломерных судов для туристических поездок по озеру. Представитель коммерческой экологической компании, многие годы специализирующейся на сборе высшей водной растительности из водоемов, убеждает присутствующих, что самым эффективным методом по снижению трофического состояния озера будет ежегодное изъятие макрофитов из озера, содержащих огромные запасы фосфора. Региональные власти предлагают отказаться от дорогостоящей технологии удаления донных отложений, а вместо этого снизить внешнюю фосфорную нагрузку путем контроля за точечными источниками, увеличить проточность озера и привлечь экологическую компанию для ежегодного изъя-

тия из озера макрофитов. Слово берет ученый-эколог... то есть Вы. Какую бы точку зрения Вы поддержали, исходя из экологической эффективности и экономической целесообразности возможных мероприятий по борьбе с антропогенным эвтрофированием? Хорошо продумайте Ваши аргументы, чтобы убедить ту или иную заинтересованную сторону в необходимости проведения конкретного мероприятия для достижения поставленной цели (перевод озера в мезотрофное состояние). Возможно ли перевести озеро в чистое олиготрофное состояние в долгосрочной перспективе?

2. Установлено, что в гиперэвтрофное мелководное озеро (площадь — 57 км^2 , средняя глубина — 1.5 метра) ежегодно с притоками и с водосбора поступает 18 т фосфора. Расчеты внутренней фосфорной нагрузки на основе проведенных лабораторных экспериментов по скорости выделения этого элемента из донных отложений показали годовую величину в 100 т фосфора. Поскольку внутренняя фосфорная нагрузка значительно превышает внешнюю, для перевода озера в мезотрофное состояние планируется осуществить дорогостоящее мероприятие — полностью изолировать донные отложения от поступления фосфора в озеро. Используя диаграмму Р. Фолленвайдера, продумайте последовательность необходимых расчетов и ответьте на вопрос: приведет ли планируемое мероприятие к желаемому результату?

Задание 10. Одним из негативных последствий антропогенного эвтрофирования является возникновение токсичного «цветения воды» из-за чрезмерного роста фитопланктона. Поэтому важным этапом в изучении антропогенного эвтрофирования является установление лимитирующих факторов развития фитопланктона. Для этих целей часто используется отношение Редфилда ($\text{C:N:P}=106:16:1$), показывающее молярное соотношение в биомассе фитопланктона основных биогенных элементов углерода, азота и фосфора, необходимых для нормального функционирования продуцентов. Любое отклонение от этого соотношения можно использовать для оценки того, какой из биогенных элементов является лимитирующим. Исходя из этого, определите, что лимитирует развитие фитопланктона в трех озерах.

Водоем	C:N:P в фитопланктоне
Озеро 1	200:35:1
Озеро 2	106:4:1
Озеро 3	500:16:1

Задание 11. Несмотря на, казалось бы, окончательно доказанный факт ключевой роли фосфора в эвтрофикации пресноводных водоемов, причины антропогенного эвтрофирования разных типов водных экосистем до сих пор остро обсуждаются. Свидетельством продолжающегося так называемого «спора о фосфоре» является разгоревшаяся в настоящее время дискуссия на страницах одного из самых престижных научных журналов Science. Так, предлагается контролировать эвтрофирование путем снижения поступления в водоем не только фосфора, но и азота. А какова роль глобального потепления в эвтрофировании? Проанализируйте предложенные материалы, доводы в пользу какой точки зрения о важности фосфора и/или азота, повышения температуры в возникновении и контроле антропогенного эвтрофирования показались вам наиболее убедительными? Сформулируйте их в тетради в виде кратких тезисов.

1. Conley D. J., Paerl H. W., Howarth R. W., Boesch D. F., Seitzinger S. P., Havens K. E., Lancelot C., Likens G. E. *Controlling Eutrophication: Nitrogen and Phosphorus* // Science. 2009. V. 323. P. 1014–1015.

2. Paerl H. W., Gardner W. S., McCarthy M. J., Peierls B. L., Wilhelm S. W. *Algal blooms: noteworthy nitrogen* // Science. 2014. V. 346. P. 175.

3. Schindler D. W., Hecky R. E. *Eutrophication: More Nitrogen Data Needed* // Science. 2009. V. 324. P. 721–722.

4. Schelske C. L. *Eutrophication: Focus on Phosphorus* // Science. 2009. V. 324. P. 722.

5. Bryhn A. C., Hakanson L. *Eutrophication: Model Before Acting* // Science. 2009. V. 324. P. 723.

6. Jacoby C. A., Frazer T. K. *Eutrophication: Time to Adjust Expectations* // Science. 2009. V. 324. P. 723–724.

7. Conley D. J., Paerl H. W., Howarth R. W., Boesch D. F., Seitzinger S. P., Havens K. E., Lancelot C., Likens G. E. *Response* // Science. 2009. V. 324. P. 724–725.

8. Brookes J. D., Carey C. C. *Resilience to Blooms* // Science. 2011. V. 334. P. 46–47.

9. Paerl H. W., Huisman J. *Blooms Like It Hot* // Science. 2008. V. 320. P. 57–58.

10. Finlay J. C., Small G. E., Sterner R. W. *Human influences on nitrogen removal in lakes* // Science. 2013. V. 342. P. 247–250.

Контрольные вопросы по теме

1. Концепция трофического статуса водоемов: дайте определение термину «трофический тип водоема 2. Кто впервые предложил это понятие? Расскажите о классификации водоемов по уровню биологической продуктивности.

2. Охарактеризуйте олиготрофные, мезотрофные, эвтрофные и дистрофные водоемы по следующим показателям: морфометрия, тип грунта, концентрация биогенных элементов, прозрачность, цветность воды, содержание кислорода, рыбопродуктивность, уровень развития тех или иных биологических сообществ. Приведите примеры подобных водоемов в Ярославской области.

3. Сукцессия водных экосистем: что такое естественное и антропогенное эвтрофирование, деэвтрофирование (реолиготрофизация)? Приведите примеры.

4. Причины развития антропогенного эвтрофирования: температура, освещенность или другие факторы? «Спор о фосфоре». Перечислите типы исследований и экспериментов, которые доказали ключевую роль фосфора в эвтрофировании водоемов. Что такое отношение Редфильда? Что оно показало в отношении лимитирования фитопланктона в водоемах? Какие ещё биогенные элементы «подозреваются» в развитии процесса эвтрофирования?

5. Концепция биогенной нагрузки — в чем её суть? Дайте точное определение тому, что такое фосфорная (азотная) нагрузка. Чем внешняя биогенная нагрузка отличается от внутренней нагрузки?

6. Фосфор и азот в водоемах, их лимитирующая роль для фитопланктона: расскажите, в состав каких живых структур входят

эти элементы, их роль в организмах, формы присутствия и особенности круговорота в водоемах.

7. Какова роль макрофитов во внутриводоемном круговороте фосфора? Как можно использовать макрофиты в реабилитации водных экосистем?

8. Объясните, почему в процессе обмена фосфора между дном и водной толщей важную роль играют кислород и железо. Почему знание этого процесса важно при разработке методов восстановления водоемов? Почему снижать концентрацию фосфора в водоемах проще, чем концентрацию азота, с какими особенностями круговоротов этих элементов в биосфере это связано?

9. Показатели трофического состояния водоемов: химические, биологические, физические. Подробно расскажите о достоинствах и недостатках каждого из показателей при оценке трофического статуса водоемов.

10. Индикаторная роль биологических сообществ: выявите основные тенденции в изменении структуры фитопланктона, зоопланктона, зообентоса, макрофитов и ихтиоценоза по мере эвтрофирования водоемов. Отобразите эти изменения на графиках, где по оси абсцисс отложите возрастание трофического статуса (от олиго- до эвтрофного), а по оси ординат — относительный вклад в обилие (сообщества, групп, видов).

11. Чем номенклатурные трофические шкалы отличаются от нумерических? Каково преимущество последних? Что такое индексы трофического состояния ИТС (trophic state index, TSI)? Приведите примеры известных вам ИТС.

12. Расскажите об этапах развития антропогенного эвтрофирования. Каковы источники и последствия для человека антропогенного эвтрофирования? Какие типы источников эвтрофирования легче контролировать при восстановлении водоемов и почему?

13. Что такое «цветение воды»? Чем опасно данное явление? Почему особенно опасно цианобактериальное цветение воды?

14. Восстановление водных экосистем через снижение биогенной нагрузки: модель Р. Фолленвайдера. Объясните суть диаграммы Р. Фолленвайдера, покажите, как её используют для борьбы с антропогенным эвтрофированием.

Рекомендуемая литература

Основная

1. Науменко, М. А. Эвтрофирование озер и водохранилищ : учеб. пособие / М. А. Науменко. — СПб. : РГГМУ, 2007. — 100 с.
2. Даденко, Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ : Гидролого-гидрохимические аспекты / Ю. С. Даденко. — М. : ГЕОС, 2007. — 252 с.
3. Хендерсон-Селлерс, Б. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования / Б. Хендерсон-Селлерс, Х. Р. Маркленд. — Л. : Гидрометеиздат, 1990. — 487 с.

Дополнительная

1. Андроникова, И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем / И. Н. Андроникова. — СПб. : Наука, 1996. — 189 с.
2. Антропогенное воздействие на малые озера / отв. ред. И. С. Коплан-Дикс, Е. А. Стравинская. — Л. : Наука, 1980. — 174 с.
3. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / [отв. ред. Н. А. Петрова]. — Л. : Наука, 1982. — 304 с.
4. Бульон, В. В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах / В. В. Бульон. — СПб. : Наука, 1994. — 222 с.
5. Бульон, В. В. Закономерности первичной продукции планктона и их значение для контроля и прогнозирования трофического состояния водных экосистем / В. В. Бульон // Биология внутренних вод. — 1997. — № 1. — С. 13–22.
6. Драбкова, В. Г. Восстановление экосистем малых озер / В. Г. Драбкова, М. Я. Прыткова, О. Ф. Якушко. — СПб. : Наука, 1994. — 144 с.
7. Гусаков, Б. Л. Критическая концентрация фосфора в озерном притоке и её связь с трофическим уровнем водоема / Б. Л. Гусаков // Элементы круговорота фосфора в водоемах. — Л. : Наука, 1987. — С. 7–17.
8. Китаев, С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов / С. П. Китаев. — Петрозаводск : КНЦ РАН, 2007. — 395 с.

9. Минеева, Н. М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ / Н. М. Минеева. — М. : Наука, 2004. — 156 с.
10. Петрова, Н. А. Сукцессия фитопланктона при антропогенном эвтрофировании больших озер / Н. А. Петрова. — Л. : Наука, 1990. — 200 с.
11. Покровская, Т. Н. Макрофитные озера и эвтрофирование / Т. Н. Покровская, Н. Я. Миронова, Г. С. Шилькрот. — М. : Наука, 1983. — 152 с.
12. Прыткова, М. Я. Научные основы и методы восстановления озерных экосистем при разных видах антропогенного воздействия / М. Я. Прыткова. — СПб. : Наука, 2002. — 148 с.
13. Россолимо, Л. Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора / Л. Л. Россолимо. — М. : Наука, 1977. — 144 с.
14. Трифонова, И. С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона / И. С. Трифонова. — Л. : Наука, 1990. — 182 с.
15. Хрисанов, Н. И. Управление эвтрофированием водоемов / Н. И. Хрисанов Г. К. Осипов. — СПб. : Гидрометеиздат, 1993. — 278 с.
16. Эволюция круговорота фосфора и эвтрофирование природных вод / отв. ред. К. Я. Кондратьев, И. С. Коплан-Дикс. — Л. : Наука, 1988. — 204 с.
17. Dodds, W. K. Freshwater Ecology: concepts and environmental applications of limnology / W. K. Dodds, M. R. Whiles. — Elsevier Academic Press, 2010. — 813 p.

Тема 2. Трофическая структура водных экосистем. Теория динамики пищевых цепей

На лекциях по данной теме дается представление о современных гипотезах и теориях, связанных с концепцией динамики пищевых цепей в водных экосистемах. Студенты узнают о гипотезах «зеленого мира» (HSS hypothesis) и размерной эффективности (*size-efficiency hypothesis*) и о той роли, которую эти гипотезы сыграли в разработке теории трофического каскада. Подробно излагаются отличия теории трофического каскада от теории контроля «снизу-вверх» и «сверху-вниз» (*«bottom-up/top-down theory»*). После этого рассказывается о дальнейшем развитии теоретических представлений о структуре и функционировании пищевых сетей в водных экосистемах: гипотезе экосистемной эксплуатации (*ecosystem exploitation hypothesis*) и модели Фретвелла — Оксанена. Последний штрих в рассказе о современных представлениях в области разработки теории динамики пищевых цепей — это знакомство студентов с кардинальной сменой представлений о роли редуцентов (бактериопланктона) в водных экосистемах, изложение сути концепции микробной петли. Оканчивается серия лекций по данной теме изложением прикладных аспектов использования теории динамики пищевых цепей, связанных с контролем антропогенного эвтрофирования через регулирование структуры трофических цепей в водных экосистемах (биоманипуляция). Тем самым обеспечивается логическая связь данной темы с темой 1. Для подтверждения тех или иных теоретических положений используются многочисленные примеры и результаты реально проведенных экспериментальных исследований, опубликованных в высокорейтинговых зарубежных научных журналах. Таким образом студентам прививается логика и методология реальных научных исследований в области водной экологии.

Ключевые слова

Гипотеза «зеленого мира» (HSS hypothesis); гипотеза размерной эффективности (*size-efficiency hypothesis*); концепция трофического каскада; поведенческий каскад; теория контроля «снизу-вверх» и «сверху-вниз» (*«bottom-up/top-down theory»*); гипотеза

экосистемной эксплуатации (*ecosystem exploitation hypothesis*); модель Фретвелла — Оксанена; гипотеза ключевого хищника/потребителя; микробная петля.

Содержание практических занятий

Практические занятия по данной теме проводятся в форме семинаров, на которых студенты при участии преподавателя обсуждают выбранные для дискуссии вопросы, представленные ниже в виде отдельных заданий. Кроме того, для освоения материала темы предусматривается проведение лабораторной работы.

Задание 1. В эвтрофных озерах часто наблюдаются зимние «заморы» рыб из-за дефицита кислорода, который быстро расходуется подо льдом на окисление органического вещества. Иногда после таких массовых заморов рыбы лимнологи фиксируют на следующий год после замора увеличение прозрачности воды за счет снижения развития фитопланктона, хотя концентрация биогенных элементов, как правило лимитирующих развитие микрородорослей, в воде может оставаться неизменной. Как вы можете объяснить подобные изменения?

Задание 2. Опишите, какие корреляционные связи по направлению (положительную (прямую) корреляцию или отрицательную (обратную) корреляцию) вы ожидаете обнаружить, исследовав несколько небольших озер:

А. Между биомассой хищных рыб и биомассой растительноядного зоопланктона?

Б. Между биомассой хищных рыб и биомассой фитопланктона?

В. Между биомассой планктоядных рыб и биомассой растительноядного зоопланктона?

Г. Между биомассой планктоядных рыб и биомассой фитопланктона?

Подумайте, в каких случаях взаимодействия двух трофических уровней будет преобладать «top-down», а в каких — «bottom-up» контроль?

Задание 3. В рамках гипотезы мезотрофного максимума (Carney, 1990; Elser, Goldman, 1991) утверждается, что «top-down» эффект более выражен (т. е. изменение рыбных запасов быстро приводит к снижению цветения воды водорослями) в озерах мезотрофного типа. Объясните, как согласуется эта гипотеза с данными Л. Персона с соавторами (Persson et al., 1992) о том, что в олиготрофных и эвтрофных озерах Европы отмечается значительно меньшая плотность популяций хищных рыб по сравнению с мезотрофными озерами?

Задание 4. Очень часто исследователи обнаруживают доказательство наличия «top-down» контроля, изучая связи между трофическими уровнями в разных водоемах. Как вы думаете, в каком случае легче получить подобные доказательства: при изучении водоемов примерно одного и того же трофического статуса (например, только мезотрофные или только олиготрофные) или при наличии у исследователя выборки из водоемов разного трофического статуса?

Задание 5. Для того чтобы обнаружить «top-down» и «bottom-up» эффекты в природных условиях, существуют разные методические подходы: можно изучать один и тот же водоем в течение многих лет, собирая данные о концентрациях биогенных элементов и состоянии трофических уровней, либо получать данные в кратковременных экспедициях на разных водоемах. Объясните, при каком из этих подходов легче выявить «top-down» эффект в трофической цепи, а при каком — «bottom-up» эффект.

Задание 6. Часто манипулирование рыбными запасами в разных озерах приводит к одному и тому же результату — снижению цветения воды микроводорослями, однако механизмы этого процесса могут отличаться. Одним из механизмов исчезновения цветения воды является возникновение трофического каскада («top-down» эффект). С целью проверки данной гипотезы было проведено 2 эксперимента в мезокосмах (пластиковых емкостях), помещенных в разные озера. В одних емкостях с естественным планктоном рыбы были удалены, в других емкостях рыбы присутствовали. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

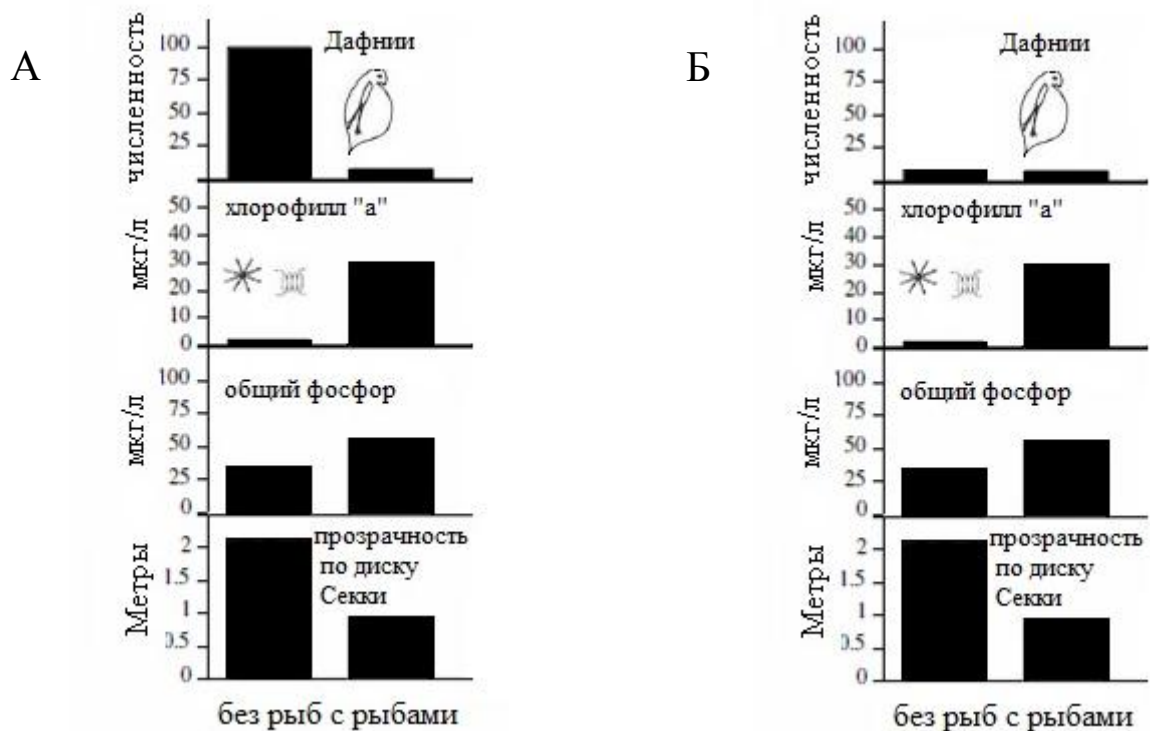


Рис. 2. Результаты экспериментов, проведенных в больших пластиковых емкостях, в присутствии и в отсутствие планктоядных рыб на разных озерах (А и Б) (рисунок взят из : Brönmark, Hansson, 2005 с изменениями)

Объясните, почему произошли соответствующие изменения численности дафний, концентрации хлорофилла «а», общего фосфора и прозрачности воды при удалении рыб из емкостей в первом озере (рис. 2А)? Смогли ли результаты эксперимента опровергнуть гипотезу трофического каскада? Заметьте, что в эксперименте на другом озере (рис. 2Б) удаление рыб из мезокосмов не привело к изменению численности дафний, однако, как и в первом эксперименте, цветение воды исчезло (уменьшилось содержание хлорофилла «а»). Как вы можете объяснить эти неожиданные результаты? Имел ли место здесь трофический каскад? Почему можно говорить о косвенном «bottom-up» эффекте рыб на фитопланктон во втором эксперименте?

Для ответов на эти вопросы рекомендуется ознакомиться со статьями:

1. Колмаков В. И., Кравчук Е. С., Грибовская И. В., Гладышев М. И. Экспериментальное изучение возможных механизмов стимулирующего влияния на рост цианопрокариот их

транзита через кишечник *Carassius auratus* // Доклады АН. 2002. Т. 384. № 2. С. 278–280.

2. Гладышев М. И., Чупров С. М., Колмаков В. И., Дубовская О. П., Задорин А. А., Зуев И. В., Иванова Е. А., Кравчук Е. С. Биоманипуляция в обход трофического каскада на небольшом водохранилище // Доклады АН. 2003. Т. 390. № 2. С. 276–277.

Задание 7. Ключевым звеном осуществления трофического каскада в водных экосистемах является выедание зоопланктоном фитопланктона. Исследователь, решив проверить гипотезу о способности зоопланктона потреблять фитопланктон, провел следующий эксперимент: профильтровал озерную воду через планктонную сеть, удалив таким образом зоопланктон, и поместил эту профильтрованную воду, содержащую теперь только фитопланктон, в несколько емкостей. Параллельно в качестве контроля исследователь взял столько же емкостей, но с не профильтрованной водой из того же озера, содержащей и фитопланктон и зоопланктон. Результаты получились неожиданными: в емкостях с зоопланктоном биомасса фитопланктона резко возросла по сравнению с таковой в емкостях, где был только фитопланктон (зоопланктон был удален). Как бы вы могли объяснить результаты данного эксперимента? Полученные данные подтвердили или опровергли наличие трофического каскада в этом озере? Свидетельствуют ли результаты о том, что зоопланктон этого озера не способен потреблять фитопланктон?

Задание 8. В озерах после весеннего пика биомассы фитопланктона часто наблюдается резкий коллапс в развитии водорослей в начале лета, в гидробиологии эта особенность сезонной динамики планктона получила название «стадия чистой воды» (clear water stage). Предполагается, что причинами спада в обилии фитопланктона может быть увеличение выедания со стороны зоопланктона, биомасса которого в этот период, как правило, возрастает, либо низкие концентрации биогенных элементов, что является следствием бурного весеннего развития самого фитопланктона и, соответственно, потребления им биогенов из воды до уровня лимитирования. Для проверки этих 2 гипотез исследователи провели эксперимент, результаты которого показали, что удаление зоопланктона из воды не приводило к стадии чистой воды как в вари-

анте с добавкой дополнительной дозы биогенных элементов, так и без добавки. Подумайте, какую из гипотез результаты эксперимента не смогли опровергнуть? Как по-другому можно спланировать эксперимент для проверки этих гипотез?

Задание 9. Присутствие планктоядных рыб в небольших водоемах может оказывать влияние не только на самые нижние трофические уровни (микроводоросли) через трофический каскад, но и на температуру воды. Так, в работе (Mazumder et al., 1990) показано, что в присутствии планктоядных рыб температура поверхности воды становилась ниже в сравнении с таковой в мезокосмах без рыб. Какие объяснения данному феномену вы можете предложить в свете теории трофического каскада? Подумайте, какие ещё, кроме температуры, абиотические характеристики водоема могут изменяться под действием эффектов «top-down» или «bottom-up»?

Задание 10. Теория динамики пищевых цепей часто используется для решения прикладных задач. Представьте, что вы имеете возможность принимать управленческие решения по вопросам охраны, рационального использования водных объектов и регулирования качества воды. В водоеме часто наблюдаются цветения воды из-за чрезмерного развития фитопланктона. Какие решения вы примете с целью борьбы с цветением воды, зная, что пищевая пелагическая цепь в водоеме крайне проста: фитопланктон → зоопланктон → планктоядные рыбы → хищные рыбы (см. рис. 3).

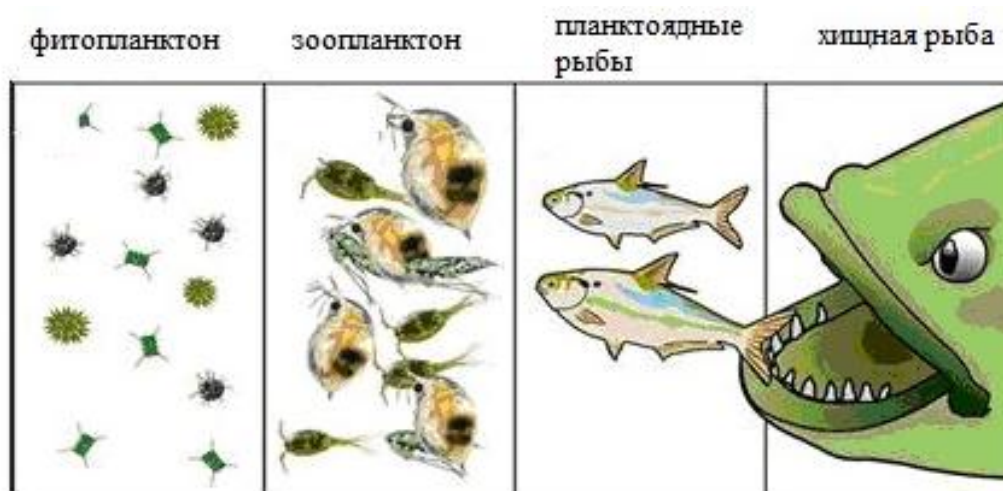


Рис. 3. Пелагическая трофическая цепь в водоеме (рис. взят с сайта www.lmvp.org с изменениями)

Возможные мероприятия по регулированию экологического состояния водоема:

- выловить хищную рыбу из водоема,
- вселить больше планктоядной рыбы в водоем,
- выловить планктоядную рыбу из водоема,
- выловить планктоядную рыбу из водоема и одновременно инокулировать в водоем беспозвоночных хищников (*Leptodora*, *Polyphemus*, *Chaoborus*),
- вселить больше хищной рыбы,
- инокулировать в водоем крупных дафний,
- выпустить в водоем планктоядных сеголеток хищных рыб,
- сократить численность бентоядных рыб в водоеме,
- очистить водоем от зарослей подводных макрофитов,
- ограничить доступ к водоему водоплавающих птиц,
- интродуцировать в водоем моллюска *Dreissena polymorpha*.

Ответы обоснуйте, нарисовав для каждого мероприятия возможные цепочки трофических и иных изменений, которые могут произойти при его осуществлении, показав таким образом, как это может повлиять на численность фитопланктона. Определите, какие мероприятия могут не иметь однозначного эффекта на фитопланктон, другими словами, могут приводить либо к увеличению его численности, либо к снижению? Для успешного решения задания рекомендуется проанализировать статьи Гладышева М. И. Биоманипуляция как инструмент управления качеством воды в континентальных водоемах (обзор литературы 1990–1999 гг.) // Биология внутренних вод. 2001. № 2. С. 3–15 и Каратаева А. Ю., Бурлаковой Л. Е. Роль дрейссены в озерных экосистемах // Экология. 1993. № 3. С. 232–236.

Лабораторная работа по теме 2

Выявление top-down и bottom-up эффектов
в водном микрокосме

Цель работы: изучить в условиях лабораторного микрокосма эффекты, связанные с трофическим каскадом.

Задачи работы. В результате проведения работы студенты должны ответить на следующие вопросы:

1. Имел ли место «top-down» контроль нижних трофических уровней со стороны верхних в пищевой цепи водного лабораторного микрокосма?

2. Проявился ли «bottom-up» эффект в трофической цепи водного лабораторного микрокосма?

3. Какой из эффектов (top-down или bottom-up) был наиболее выражен в условиях лабораторного микрокосма и почему?

4. Влияло ли присутствие рыб на обилие организмов нижнего трофического уровня водного микрокосма (водоросли) косвенно, в обход трофического каскада?

Необходимый материал, оборудование и реактивы.
Для проведения лабораторной работы необходимо заранее подготовить следующие позиции:

1) экспериментальные сосуды объемом 500 мл или больше (колбы),

2) культура любой зеленой водоросли (*Chlorella*, *Scenedesmus*),

3) культура любого вида ветвистоусых рачков (*Daphnia*, *Ceriodaphnia*, *Simoccephalus*),

4) аквариумные рыбки,

5) растворы азота и фосфора,

6) спектрофотометр или микроскопы со счетной камерой (например, Нажотта, Горяева),

7) бинокляр,

8) материалы для проведения спектрофотометрического определения пигментов: ступки и пестики, мембранные фильтры любой марки (например, Владипор, Владисарт, Whatman), фильтровальная установка, центрифуга с центрифужными пробирками, 90 %-й ацетон, 0.1N HCl, CaCO₃, пробирки на 10 мл или больше, пипетки.

Методические рекомендации по выполнению работы.
До выполнения лабораторной работы студенты разрабатывают план эксперимента, который должен включать проработку следующих вопросов: необходимое число вариантов эксперимента для того, чтобы ответить на все поставленные в работе вопросы, схема пространственного размещения экспериментальных сосудов на лабораторном столе, наличие повторностей для каждого вариан-

та эксперимента, выбор методов математической обработки предполагаемых результатов с учетом возможного эффекта множественных сравнений, наличие контрольного варианта эксперимента, учет мнимых повторностей (псевдорепликаций), выбор показателей отклика, которые будут фиксироваться в процессе проведения работы (например, численность водорослей). После решения всех этих вопросов группа приступает к постановке эксперимента. Количество вариантов эксперимента может варьировать в зависимости от имеющегося оборудования, материалов и времени на проведение лабораторной работы. Максимально можно поставить следующие варианты эксперимента:

1. Сосуды с культурой водоросли (контроль).
2. Сосуды с культурой водоросли и добавкой биогенных элементов (азота и фосфора).
3. Сосуды с культурой водоросли и планктонными рачками-фильтраторами.
4. Сосуды с культурой водоросли, планктонными рачками-фильтраторами и добавкой биогенных элементов (азота и фосфора).
5. Сосуды с культурой водоросли и аквариумными рыбками.
6. Сосуды с культурой водоросли, аквариумными рыбками и добавкой биогенных элементов (азота и фосфора).
7. Сосуды с культурой водоросли, планктонными рачками-фильтраторами и аквариумными рыбками.
8. Сосуды с культурой водоросли, планктонными рачками-фильтраторами, аквариумными рыбками и добавкой биогенных элементов (азота и фосфора).

В результате имеется набор микрокосм с разным числом трофических уровней — от одного (только водоросли) до трех (водоросли, рачки-фильтраторы, планктоядные рыбы) (top-down эффект) с добавкой или без добавки биогенных элементов (bottom-up эффект).

Ещё один интересный вопрос, который можно выяснить на лабораторной работе, — влияние состава фитопланктона на эффект трофического каскада. Для этого можно поставить другую серию экспериментов, состоящую из следующих вариантов:

1. Сосуды с культурой зеленой водоросли (*Chlorella*, *Scenedesmus* и др.).

2. Сосуды с культурой цианобактерии (*Microcystis*, *Gloeocapsa*, *Aphanizomenon* и др.).

3. Сосуды с культурой зеленой водоросли и планктонными рачками-фильтраторами.

4. Сосуды с культурой цианобактерии и планктонными рачками-фильтраторами.

5. Сосуды с культурой зеленой водоросли, планктонными рачками-фильтраторами и рыбами.

6. Сосуды с культурой цианобактерии, планктонными рачками-фильтраторами и рыбами.

Важен вопрос о выборе показателей отклика экспериментальной системы, которые будут измеряться в ходе проведения лабораторной работы. Эти показатели должны быть легко определяемы и чувствительны к применяемым воздействиям (наличие рыбы, добавка биогенных элементов). В зависимости от имеющегося оборудования можно измерять пигментные характеристики водорослей (концентрация хлорофилла «а», продуктов его распада — феопигментов) либо определять непосредственно численность водорослей в сосудах, число оставшихся в сосудах особей рачков-фильтраторов в конце эксперимента.

Лабораторная работа по времени разделяется на 3 части:

1. Постановка эксперимента (2 часа), студенты готовят все выбранные варианты эксперимента, разливают в сосуды культуру водорослей, добавляют растворы биогенных элементов, рассаживают рачков и рыб, расставляют экспериментальные сосуды на лабораторном столе с использованием выбранных схем размещения (например, полностью рандомизированная схема или блочная рандомизированная схема и т. д.). Для предотвращения оседания клеток водорослей на дно сосудов в ходе экспонирования рекомендуется либо размещать колбы на шейкере, либо использовать автоматическую продувку сосудов воздухом через систему трубочек, как показано на рис. 4, либо осуществлять периодически перемешивание содержимого сосудов вручную.



Рис. 4. Учебная лабораторная микроэкосистема для изучения top-down и bottom-up эффектов

2. Экспонирование сосудов (от 1 до 2 недель). В этот период не требуется постоянного присутствия студентов в лаборатории. Однако рекомендуется периодически проверять ход эксперимента и состояние микрокосмов, следить за смертностью рыб, в случае необходимости удалять мертвых и подсаживать живых особей.

3. Окончание эксперимента, измерение показателей отклика, обработка полученных данных (по времени на этот этап лучше выделить целый учебный день, 5–10 часов). Студентам необходимо аккуратно подсчитать число оставшихся особей рачков-фильтраторов в тех сосудах, в которых они присутствовали. Удалить из сосудов рыбу и профильтровать воду через мембранные фильтры, измерив при этом объем профильтрованной воды. В зависимости от имеющегося оборудования студенты либо проводят анализ содержания пигментов водорослей, собранных на фильтры, стандартным спектрофотометрическим методом (Сигарева, 1993; ГОСТ 17.1.4.02-90), либо определяют численность водорослей в каждом сосуде в счетных камерах под световым микроскопом. В результате каждый студент получает набор данных об обилии водорослей в разных вариантах эксперимента, которые должны быть обработаны статистически.

Статистическая обработка результатов работы

Результаты проведенной лабораторной работы должны быть наглядно представлены в виде таблиц, графиков и данных статистических тестов (рассчитанных p -уровней значимости). Студенты

самостоятельно определяют, какими методами математической статистики необходимо обработать полученные данные, чтобы ответить на поставленные вопросы работы. К примеру, чтобы ответить на второй вопрос (см. задачи работы), нужно определить статистически ли значимо отличаются средняя концентрация хлорофилла «а» в контрольных сосудах от средней концентрации хлорофилла «а» в сосудах с культурой водоросли и добавкой биогенных элементов (азота и фосфора). Для этого можно использовать соответствующий статистический тест, предварительно проверив условия его применимости к полученным данным.

Рекомендуется нарисовать таблицу с исходными данными (концентрации пигментов, численность водорослей и рачков-фильтраторов) по всем вариантам эксперимента. Затем построить столбчатую диаграмму, которая наглядно отражала бы измеренный количественный показатель отклика по вариантам эксперимента (контроль, контроль с добавкой биогенов и т. д.). Для этого на оси абсцисс обозначаются варианты эксперимента, а на оси ординат откладывается измеряемый показатель отклика для каждого варианта, как показано на рис. 5. Все рассчитанные средние значения показателей отклика на графиках и в таблицах необходимо сопровождать интервальными статистическими оценками (например, стандартная ошибка, доверительный интервал).

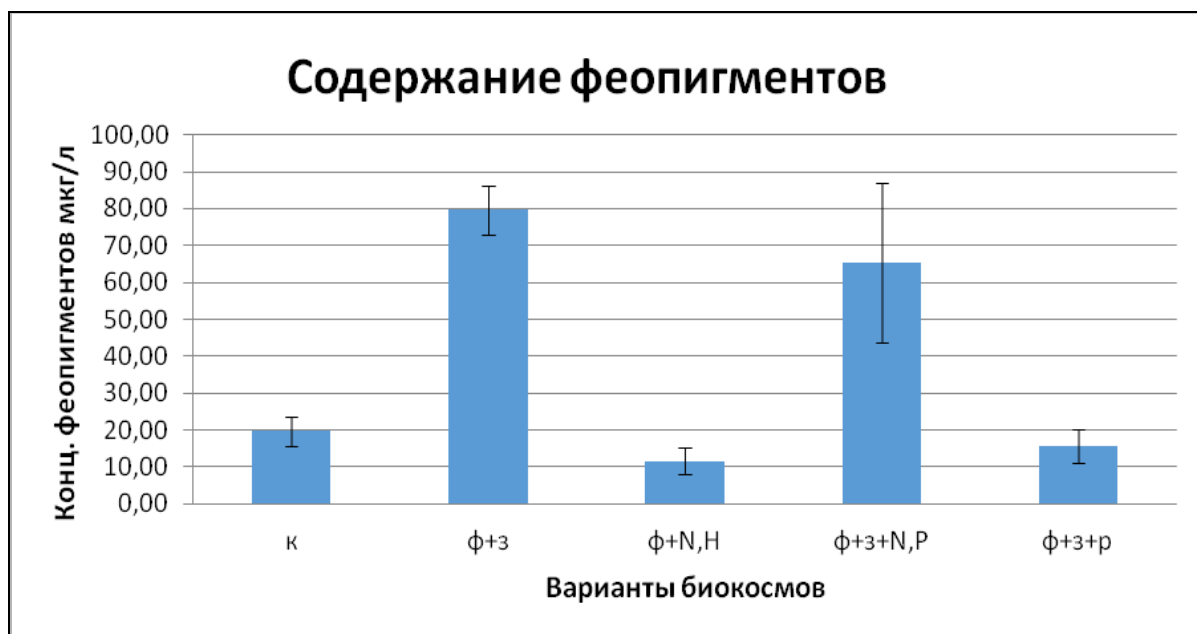


Рис. 5. Пример столбчатой диаграммы при статистической обработке результатов лабораторной работы

Оформление отчета

Каждый студент по итогам лабораторной работы оформляет отчет, который должен состоять из ВВЕДЕНИЯ (краткое изложение теоретических положений, связанных с проверяемыми в работе гипотезами трофического каскада, цели и задач работы), МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ (подробное описание методической части лабораторной работы с обоснованием выбранного плана эксперимента и методов статистической обработки полученных данных), РЕЗУЛЬТАТОВ (приводятся результаты обработки данных в виде таблиц, графиков, расчета статистических тестов), ОБСУЖДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ (с объяснением полученных результатов, выдвижением гипотез, объясняющих неожиданные результаты или возникшие противоречия между полученными данными и исходными предположениями) и ВЫВОДОВ (краткие ответы на поставленные в задачах работы вопросы).

Контрольные вопросы по теме

1. Расскажите о гипотезах «зеленого мира» (*HSS hypothesis*) и размерной эффективности (*size-efficiency hypothesis*). Сформулируйте основные положения этих гипотез. В свете этих гипотез поясните, как Д. Брукс и С. Додсон (Brooks, Dodson, 1965) объяснили наблюдения Дж. Хрбачека с соавторами (Hrbacek et al., 1961) о том, в присутствии рыб средний размерный состав зоопланктона уменьшается и при этом наблюдается цветение воды.

2. Концепция трофического каскада (*trophic cascade theory*): дайте точное определение понятию «трофический каскад», перечислите условия для его возникновения в водных экосистемах.

3. Наблюдающееся несоответствие между имеющимися в водоеме запасами биогенных элементов и уровнем развития продуцентов противоречит теории биогенной нагрузки. Как представления о трофическом каскаде помогли объяснить это противоречие?

4. Приведите конкретные примеры проявления эффекта трофического каскада в пелагических и бентических пищевых цепях, а также между водными и наземными экосистемами.

5. Что такое поведенческий каскад, его отличие от трофического каскада? Приведите примеры.

6. Теория контроля «снизу-вверх» и «сверху-вниз» («*bottom-up/top-down theory*»): сформулируйте два принципиальных отличия от теории трофического каскада.

7. Гипотеза экосистемной эксплуатации (*ecosystem exploitation hypothesis*): нарисуйте схему, поясняющую эту гипотезу, и расскажите, какой эффект возрастание продуктивности экосистемы оказывает на число трофических уровней в пищевой цепи и на обилие организмов на каждом уровне?

8. Предсказания модели Фретвелла — Оксанена: как изменяется вклад хищничества и конкуренции в регулирование обилия организмов по мере увеличения числа трофических уровней в системе; верно ли предсказание о том, что биомасса фитопланктона будет возрастать в экосистемах с четным числом трофических уровней и стабилизироваться в экосистемах с нечетным числом уровней? Ответ обоснуйте.

9. Гипотеза ключевого хищника/потребителя (*key-stone predator hypothesis*): дайте определение этому понятию. В чем отличие между ключевыми видами и видами-доминантами в сообществах или это аналогичные понятия?

10. Какие организмы в водных экосистемах могут выступать в роли ключевого хищника? Присутствие ключевого хищника в экосистеме приводит к возрастанию или снижению биоразнообразия? Ответ обоснуйте. Приведите примеры.

11. Смена представлений о роли редуцентов (бактериопланктона) в водных экосистемах: в чем суть концепции микробной петли (*microbial loop theory*), нарисуйте схему, поясняющую эту концепцию. Что такое вирусная петля?

Рекомендуемая литература

Основная

1. Алимов, А. Ф. Продукционная гидробиология / А. Ф. Алимов, В. В. Богатов, С. М. Голубков. — СПб. : Наука, 2013. — 342 с.

2. Копылов, А. И. Микробная «петля» в планктонных сообществах морских и пресноводных экосистем / А. И. Копылов, Д. Б. Косолапов. — Ижевск : Книгоград, 2011. — 332 с.

Дополнительная

1. Бульон, В. В. Структура и функция микробиальной петли в планктоне озерных экосистем / В. В. Бульон // Биология внутренних вод. — 2002. — № 2. — С. 5–14.

2. Голубков, С. М. Роль консументов в динамике пищевых цепей и функционировании водных экосистем / С. М. Голубков // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия : Биология. — 2013. — Т. 4. № 6. — С. 335–353.

3. ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Спектрофотометрическое определение хлорофилла «а». — М. : Изд-во стандартов, 1999. — 12 с.

4. Сигарёва, Л. Е. Спектрофотометрический метод определения пигментов фитопланктона в смешанном экстракте / Л. Е. Сигарёва // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоёмов. — СПб. : Гидрометеиздат, 1993. — С. 75–85.

5. Brönmark, C. The biology of lakes and ponds / C. Brönmark L.-A. Hansson. — Oxford : Oxford University Press, 2005. — 285 p.

6. Dodds, W. K. Freshwater Ecology : concepts and environmental applications of limnology / W. K. Dodds, M. R. Whiles. — Elsevier Academic Press, 2010. — 813 p.

7. Lampert, W. Limnoecology. The ecology of lakes and streams / W. Lampert, U. Sommer. — Oxford : Oxford University Press, 2007. — 324 p.

Тема 3. Восстановление водных экосистем

В лекциях последовательно рассматриваются две темы, первая посвящена введению в прикладную экологию как часть экологической деятельности, которая проектирует преобразования экологических систем на основе комплексного использования достижений в области экологии и других областей знания. У студентов формируется представление о том, что результатом научно-практической части экологической деятельности является экологический проект, пригодный для практического воплощения, и система управления этим проектом. Излагается метод прикладной экологии и его структурные компоненты (анализ, исследование, проектирование, производство, управление, экспертиза/разрешение, контроль/аудит, архив). Показана роль, которую студенты, как будущие специалисты, могут играть в каждом из компонентов. Вторая тема посвящена практическим аспектам проектирования — восстановлению водных экосистем. В лекциях раскрыты основные принципы научной концепции восстановления озёрных экосистем. Студенты узнают о четырех возможностях: восстановлении, реабилитации, замещении, невмешательстве. Рассмотрены как распространенные методы восстановления водоемов: аэрация и оксигенация гипolimниона, разбавление/вымывание, удаление донных отложений или драгирование, хемоманипуляция и активная изоляция дна, биоманипуляция, — так и редко применяемые: обработка воды альгицидами, пассивная изоляция дна, использование ультразвука, механическое удаление из озера биомассы, использование аллелопатических веществ, биогенное манипулирование, изменение световых условий. Для методов указаны характеристика, условия применимости, техническая реализация, достоинства и недостатки метода, изменения, происходящие при его применении.

Ключевые слова

Прикладная экология; ключевые абиотические, биотические показатели функционирования; принципы восстановления озерных экосистем; методы восстановления мелководных эвтрофных

озер; реабилитация; биоманипуляция; хемоманипуляция; аэрация; разбавление; удаление донных отложений.

Содержание практических занятий

Практические занятия по данной теме проводятся в форме семинаров проектного типа. Основным подходом в проведении семинара проектного типа является самостоятельная работа студентов по анализу конкретного проекта восстановления. В качестве примера взят проект по экологической реабилитации озера Неро (Ярославская область). Работа состоит из четырех блоков:

1. История оз. Неро, анализ абиотических и биотических параметров водоема. 2. Изучение принципов и методов восстановления озер и научной литературы с примерами проектов по восстановлению мелководных эвтрофных водоемов. 3. Подбор методов восстановления оз. Неро исходя из ключевых абиотических и биотических параметров его экосистемы и подготовка собственного проекта по восстановлению оз. Неро. 4. Case-study: Анализ существующего проекта по реабилитации оз. Неро, оценка методов, прогноз результатов.

Блок 1

История озера Неро. Основные абиотические и биотические параметры функционирования водоема

По опубликованным материалам (см. список литературы ниже) охарактеризуйте современное состояние оз. Неро по абиотическим и биотическим параметрам. Примените знания по экологии, гидробиологии, учениям о гидросфере и биосфере. Работа проводится в парах или группах, каждая из которых представляет доклад по одному из параметров. Группа должна предложить форму опроса по своей теме, провести его и оценить знания других студентов. В качестве формы опроса возможны краткая контрольная, тест, устный опрос и т. д.

1. Отчет о научно-исследовательской работе «Оценка современного состояния озера Неро в Ростовском муниципальном округе Ярославской области». Рукопись. Ярославль. 2011 г. 103 с.

2. Современное состояние экосистемы оз. Неро. Рыбинск: Ин-т биологии внутр. вод, 1991. 74 с.

3. Состояние экосистемы высокопродуктивного озера Неро в начале XXI века. М.: Наука, 2008. 406 с.

4. Бикбулатов Э. С., Бикбулатова Е. М., Литвинов А. С., Поддубный С. А. Гидрология и гидрохимия оз. Неро. Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский дом печати», 2003. 192 с.

Задание 1. Представить историю изучения оз. Неро. Используйте данные из первоисточников XII в. и Петровских времен об озере, материалы краеведческих исследований XIX–XX вв.

Палеоолиминологические исследования озера (рис. 6). Используя знания о гидросфере, биосфере, практических занятий по водной экологии представить историю водоема во времени от олиго- к эвтрофному и высокоэвтрофному состоянию. Для оценки изменений трофического состояния оз. Неро воспользуйтесь известными шкалами трофности водоемов по содержанию фосфора, азота, прозрачности, хлорофиллу «а» (Китаев, 2007).

Обсуждение экологической, экономической, социальной и культурной значимости водоема для г. Ростова и Ярославской области.

Практическое задание: выполните задание 7 из темы 1.

Задание 2. Дайте морфометрическую характеристику водоема. Опишите водное питание и уровневый режим озера.

Практическое задание 1

По предложенной батиметрической карте оз. Неро определите морфометрические параметры озера: площадь поверхности (зеркала), объем водной массы, и морфометрические коэффициенты — развития береговой линии, открытости. По полученным данным морфометрических коэффициентов определите вероятное происхождение котловины и условия ветрового перемешивания в период открытой воды.

Озеро Неро в позднеледниковый период.
(24-10 тысяч лет тому назад).

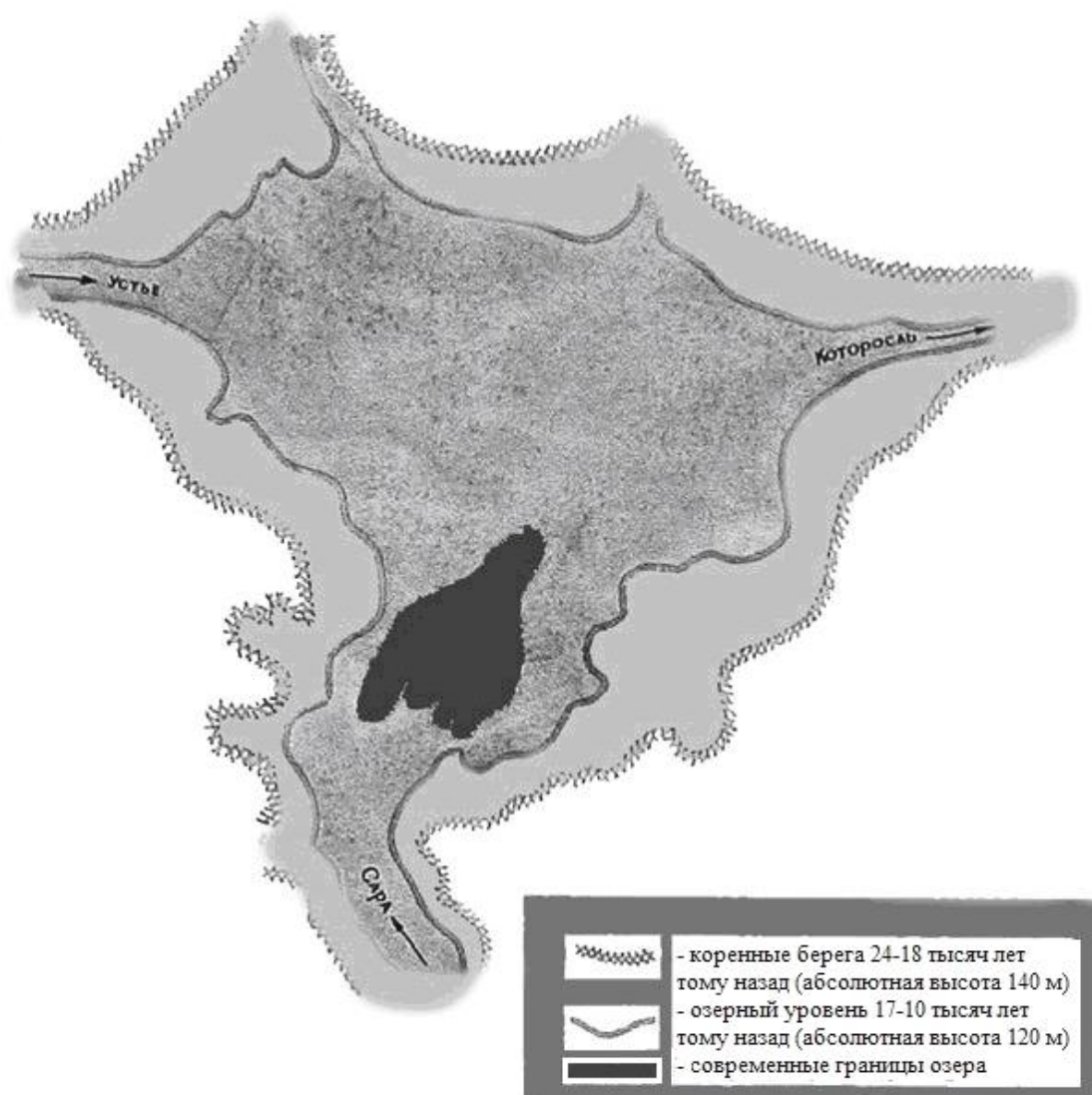


Рис. 6. Изменение размеров оз. Неро
в разные периоды существования
(приведено по: <http://dich2002.narod.ru/2004/2004-08/04080110.jpg>)

Практическое задание 2

Что такое водообмен водоема, как он исчисляется? Связь водообмена, глубины водоема с его объемом и площадью бассейна. На какие характеристики влияет водообмен, уровень водоема, площадь его бассейна, изрезанность береговой линии? Найдите

в литературе, каковы площади водосборных бассейнов и водообмены водоемов Ярославской области (Рыбинское водохранилище, оз. Плещеево), водоемов РФ и мира (например, оз. Байкал, оз. Иссык-куль, оз. Эри). Для поиска информации об озерах используйте ссылки:

1. Информационная система «Озера Земли». URL: <http://www.limno.org.ru/win/wlake.php>

2. Информационная система «Озера России». URL: <http://www.limno.org.ru/win/rlake.php>

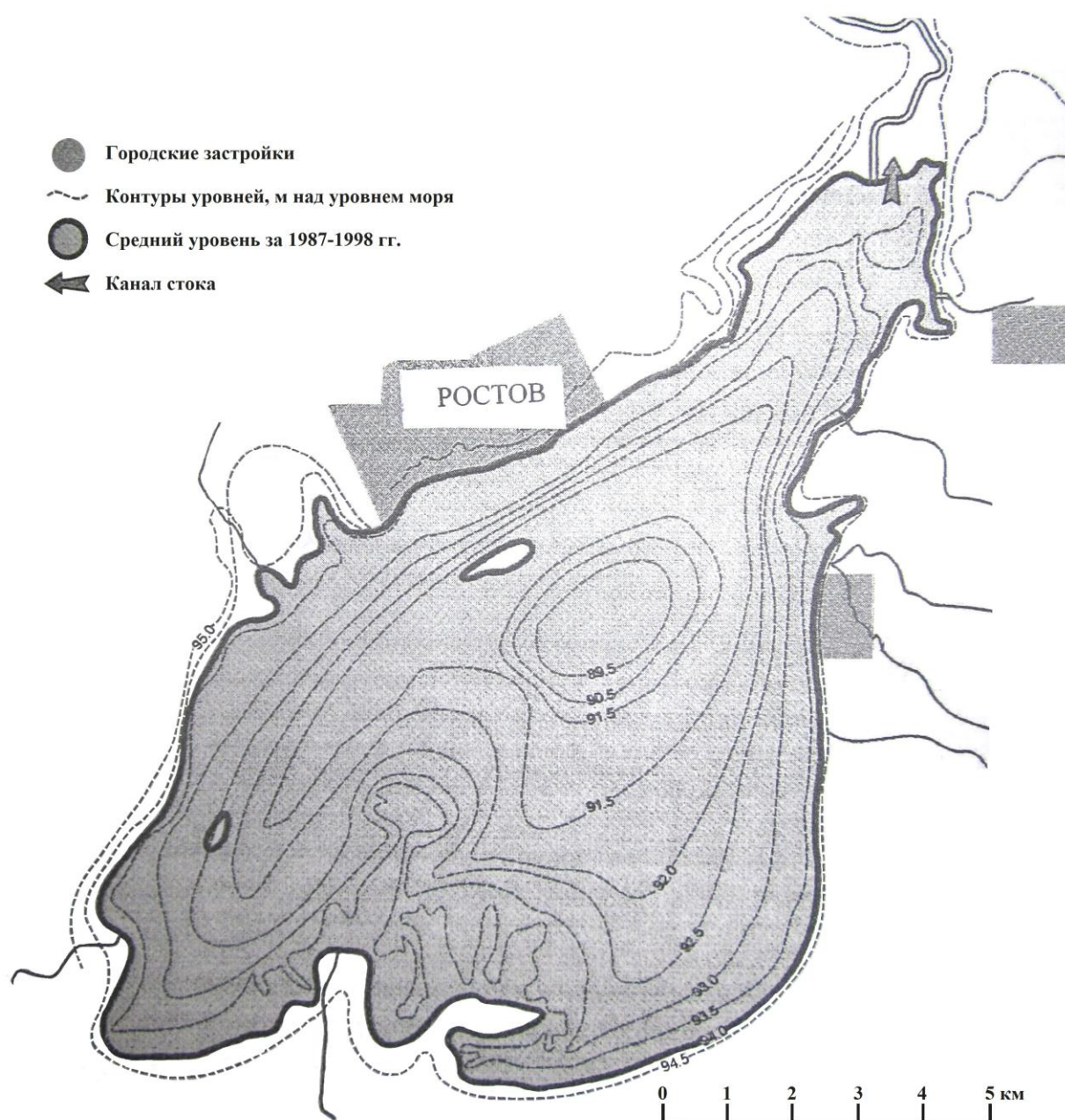
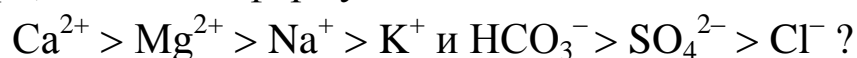


Рис. 7. Батиметрическая карта оз. Неро

Задание 3. Опишите гидрооптические характеристики и световой режим оз. Неро, термический режим, гидрохимический режим.

Ответьте на вопросы:

Как прозрачность воды определяет условия освещенности в водоеме? Как измеряется эвфотная зона в водоеме по диску Секки? От чего может зависеть прозрачность воды в озерах? Чем определена низкая прозрачность воды в оз. Неро в весенне-летний период? Какие организмы водоема в большей степени связаны с освещенностью? Как глубина водоема влияет на температурный режим? Формирование температурной стратификации водоемов в сезонной динамике, зависимость от глубины. Какими свойствами отличаются эпи- и гипolimнион? Формирование термоклина. Проанализируйте температурный режим оз. Неро в зависимости от глубины, температуры атмосферного воздуха, наличия донных отложений — сапропелей. Типы водоемов по катионно-анионному составу. Что можно сказать об оз. Неро, исходя из формулы ионного состава:



Как связаны минерализация и электропроводность воды? Найдите в литературе корреляционную связь минерализации и электропроводности. Что можно сказать о величинах pH, характерных для оз. Неро, за счет каких процессов они формируются?

Для подготовки ответов используйте книгу: Бикбулатов Э. С., Бикбулатова Е. М., Литвинов А. С., Поддубный С. А. Гидрология и гидрохимия оз. Неро. Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2003. 192 с.

Задание 4. Расскажите о донных отложениях оз. Неро.

Каковы методы и результаты работы лаборатории сапропелевых отложений Института леса АН СССР? Какие результаты получили в результате глубинных бурений в центре озера? Каков общий запас сапропелей, их состав, распределение по акватории водоема? Найдите в литературе способы использования сапропелей, в том числе разработки ярославских ученых (Хохлов Б. Н., Нефедова В. А. О хозяйственном использовании сапропеля озера Неро // Озера Ярославской области и перспективы их хозяйственного

использования. Ярославль, 1970. С. 346–361). Что может интересовать общество с коммерческих, экономических позиций?

Задание 5. Охарактеризуйте состав и количество биогенных элементов в воде оз. Неро.

Какие соединения относятся к биогенным веществам? Каково соотношение углерода, водорода, кислорода, азота и фосфора в живой клетке? Свойства и роль азота в биосфере и в живой клетке. Свойства и роль фосфора в биосфере и в живой клетке. В каких формах находится фосфор в воде? Какая гипотеза преобладала в конце XX в. относительно содержания биогенных элементов в оз. Неро? Что противоречит ей в современных исследованиях? Что означает внешняя и внутренняя биогенная нагрузка? Каково их соотношение в оз. Неро?

Практическое задание 1

В эвтрофировании водоемов принимают участие два главных биогенных элемента — азот и фосфор. Считается, что при концентрации минерального фосфора в воде ниже 0.01 мг/л и минерального азота ниже 0.3 мг/л рост фитопланктона лимитируется этими элементами.

Используя базу данных оз. Неро (см. ниже), определите, по какому из элементов происходит лимитирование фитопланктона в озере Неро в разные годы (База данных фитопланктона озера Неро (2004–2011 гг.). Свидетельство о государственной регистрации базы данных в Роспатенте № 2013620071 от 09.01.2013).

Практическое задание 2

Выполните задание 10 из темы 1.

Практическое задание 3

Большинством исследователей разделяется мнение, что при большой степени эвтрофирования лимитирование переходит от фосфора к азоту и отношение азота к фосфору снижается. Объясните причины такого перехода.

Задание 6. Представьте данные о бактериопланктоне оз. Неро.

Какова роль бактерий в организации жизни на планете? О чем свидетельствует количественное развитие бактерий в оз. Неро? Что такое первичная продукция? Что такое бактериальная продукция? Как формируется «микробная петля»? Каково ее значение в оз. Неро? Какой процент энергии бактериопланктона аккумулируется в органическом веществе консументов первого порядка?

Задание 7. Дайте характеристику качественных и количественных показателей фитопланктона озера. Какие организмы составляют звено продуцентов в озерах? Как фитопланктон может проявлять средообразующие свойства? Какова биогеохимическая функция фитопланктона в оз. Неро? Какой процент первичной продукции приходится на фитопланктон в оз. Неро? Что известно из публикаций об основной сукцессии фитопланктона в оз. Неро? Каков характер сезонной сукцессии в современный период? Какие крупные таксоны водорослей доминируют в современный период? Как концентрация хлорофилла «а» связана с биомассой фитопланктона?

1. Бабаназарова О. В. Структура фитопланктона и динамика содержания биогенных элементов в озере Неро // Биология внутренних вод. 2003. № 1. С. 31–39.

2. Babanazarova O. V., Lyashenko O. A. Inferring long-term changes in the physical-chemical environment of the shallow, enriched lake Nero from statistical and functional analyses of its phytoplankton // J. Plankton Res. 2007. V. 29. № 9. P. 747–756.

Практическое задание 1

Один из наиболее часто применяемых показателей трофии — концентрация хлорофилла «а» в воде. Известное уравнение Диллона — Риглера (1974) аппроксимирует зависимость между Chl и Робщ. Используя модель, рассчитайте для водоемов разной трофии концентрации Chl от Робщ. и сопоставьте с литературными данными.

$$\lg \text{Chl} = 1.45 \lg \text{Робщ.} - 1.14,$$

где Chl — концентрация хлорофилла «а» в воде, мкг/л;

Робщ. — содержание общего фосфора, мг/л.

Практическое задание 2

Зависимость между концентрацией хлорофилла «а» и прозрачностью воды по диску, установленная В. В. Бульоном (1977), показывает, что при увеличении количества хлорофилла прозрачность снижается по экспоненте:

$$N_{пр} = (6,46 \pm 0,62) \cdot \text{Chl «а»}^{-0,46 \pm 0,04},$$

где $N_{пр}$ — прозрачность воды в метрах;

Chl «а» — содержание хлорофилла в мг/м^3 .

Используя файл «База данных фитопланктона озера Неро (2004–2011 гг.)» рассчитайте зависимость между прозрачностью воды и концентрацией хлорофилла «а» в сестоне водоема. Сравните полученный результат с уравнением, выведенным В. В. Бульоном на целом ряде водоемов.

Практическое задание 3

Рассчитайте индекс трофического состояния (В. В. Бульона) по хлорофиллу «а» для разных частей оз. Неро. Проанализируйте результаты.

Таблица 1

***Концентрация хлорофилла «а» (мкг/л) и ИТС
для различных частей озера Неро (2003–2012 гг.)***

Хл «а» в откры- той части озера	Хл «а» в макро- фитной части озера	Хл «а» на реч- ной станции	ИТС в откры- той ча- сти озера	ИТС в макро- фитной части озера	ИТС на реч- ной станции
66,8 ± ± 4,1	13,7 ± ± 4,3	14,2 ± ± 6,2			

Формула для расчета и градация см. в задании 7 темы 1.

Задание 8. Расскажите о высшей водной растительности озера (рис. 8). Вспомните, какие виды высшей водной растительности обитают в водоемах Ярославской области. Найдите фотографии и подготовьте презентацию о наиболее распространенных

представителях высшей водной растительности оз. Неро. Какие виды преобладают? Каково соотношение сообществ воздушно-водных растений, растений с плавающими листьями и сообществ погруженных растений в озере? Как изменялась степень зарастания в обозримом историческом прошлом? Какие гипотезы могут быть выдвинуты о ключевых факторах этих изменений?

Практическое задание 1

Оптическая глубина — соотношение прозрачности воды по диску Секки ($H_{пр}$) к средней глубине ($H_{ср}$). В гидробиологической литературе эту величину часто называют коэффициентом относительной прозрачности (Китаев, 2007). Степень зарастания водоемов макрофитами (q , %) зависит от условий подводного освещения

$$q = 37.5 \cdot (H_{пр} / H_{ср}).$$

При показателях $H_{пр}/H_{ср}$ меньше 0.25 водоемы относятся к очень низкопрозрачным, олигофотобатным, при этом степень зарастания составляет около 10 % площади. При $H_{пр}/H_{ср}$ 0.25–0.5 — к низкопрозрачным, степень зарастания увеличивается до 20 % (Китаев, 2007). В зависимости от вклада в общую продукцию органического вещества водоемы относят к планктотрофным с преобладанием фитопланктонной составляющей и бентотрофным с преобладанием макрофитов.

Используя базу данных по оз. Неро, рассчитайте для него показатель условий подводного освещения q и определите, к планктотрофному или бентотрофному типу оно относится.

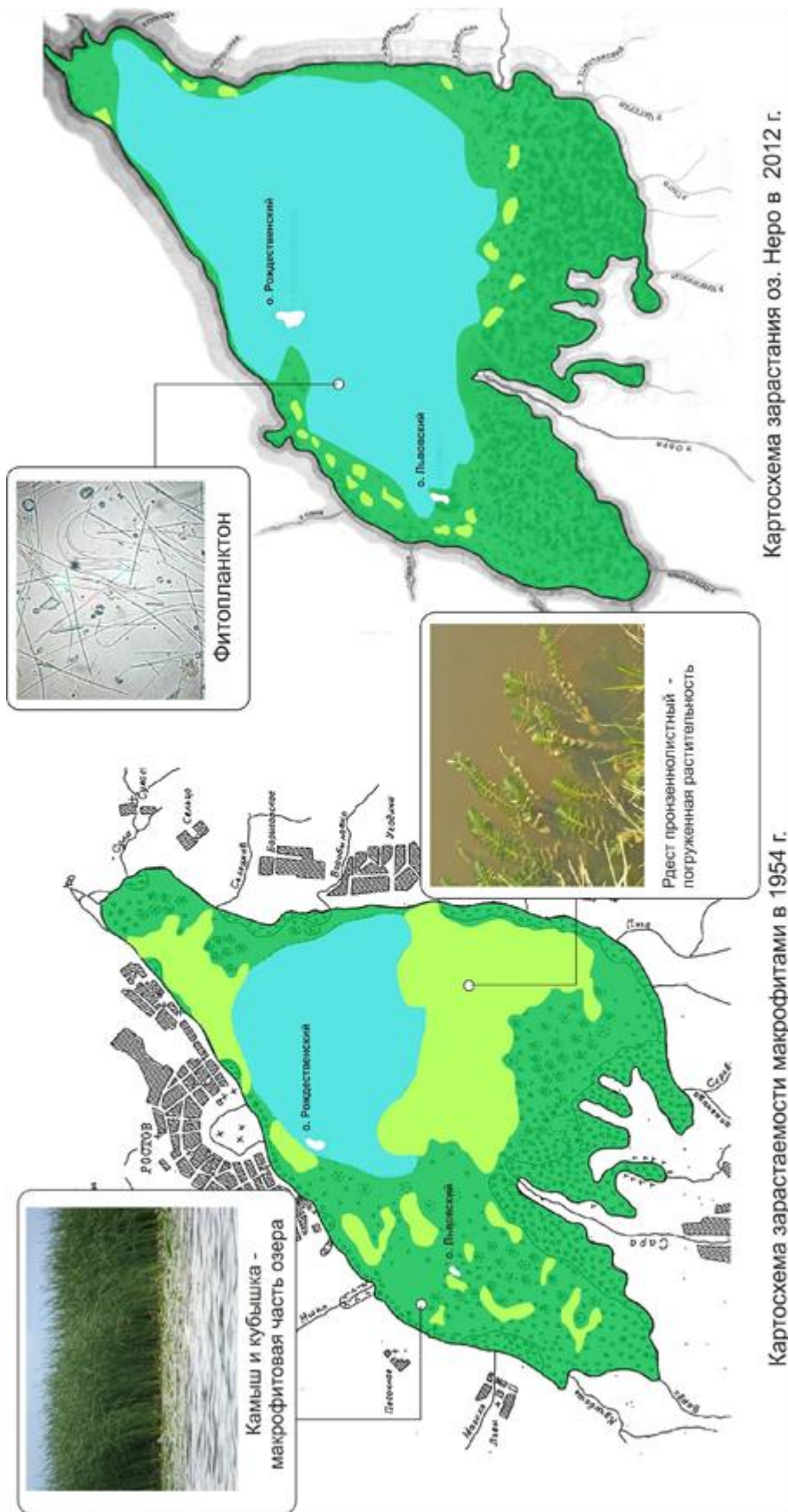


Рис. 8. Картосхема зарастания оз. Неро в 1954 и 2012 гг.
 Темно-зеленый цвет — гелофиты, зеленый — гидрофиты с плавающими листьями, желтый — погруженные гидрофиты
 (рис. взят из кн.: Экологический атлас Ярославской области, 2015)

Задание 9. Зоопланктон. Назовите основное отличие гетеротрофов от автотрофов. Какие типы пищевых цепей можно выделить в водоемах? Какие особенности в структуре зоопланктона важны при определении трофности водоема, характера перехода энергии от автотрофов к первому гетеротрофному звену консументов? О чем свидетельствует отношение общих биомасс зоо- и фитопланктона $B_z/B_{ph} = 0.05$ в оз. Неро? Как зарастаемость озера макрофитами связана с составом зоопланктона?

Задание 10. Зообентос. Вспомните и охарактеризуйте основные группы зообентоса. К каким крупным таксонам животных относятся хирономиды, олигохеты, моллюски и пиявки? Когда в оз. Неро формируется максимальная биомасса зообентоса, за счет какой группы и почему? Почему организмам бентоса сложно жить в оз. Неро? К какому типу водоемов по обилию бентоса можно отнести оз. Неро?

Задание 11. Ихтиофауна (рыбы). Как исторические данные могут быть использованы в реконструкции рыбных запасов озера? Представьте данные по видовому и количественному составу ихтиофауны на период последних наблюдений 2003 г. Представьте изменения биологии и морфологии леща в оз. Неро по результатам исследований. Обоснуйте уменьшение уловов леща — основного объекта промысла, сопоставьте с экологическими условиями. Проведите аналогичный анализ по хищникам (щука и судак), плотве и густере. Что можно сказать о характере трофических связей в ихтиоценозе оз. Неро? О чем свидетельствуют результаты исследований кормовой базы основных представителей ихтиофауны озера? Проведите анализ многолетней динамики структуры рыбного населения за длительный период наблюдений на оз. Неро.

Задание 12. Рыбохозяйствование на водоеме. Проведите реконструкцию рыбохозяйствования на озере. Определите основные регламенты природопользования, которые использовались нашими предками в устройстве рыбного промысла в водоеме. Что происходит со структурой рыбного населения?

Задание 13. Паразиты рыб. Паразиты рыб как фактор регуляции численности и структуры гидробионтов. Покажите экологи-

ческую роль паразитизма. Каковы результаты паразитологических исследований на оз. Неро? Обоснуйте необходимость дальнейших исследований.

Задание 14. Орнитофауна (птицы). Млекопитающие. Найдите и представьте последние исследования орнитофауны и млекопитающих на оз. Неро. Проанализируйте состояние изученности.

Задание 15. Загрязнение, качество вод и мутагенная активность воды оз. Неро. Какие существуют критерии загрязнения вод? Что такое ПДК? Как рассчитывается и о чем свидетельствует индекс ИЗВ и УКИЗВ? Самостоятельно найдите и дополните таблицу (табл. 2) по качеству воды оз. Неро за период 1994–2010 гг. по приоритетным загрязняющим веществам (данные ЯЦГМС), используя доступную информацию по современному периоду. Используя данные из отчета (Отчет..., 2011) и «Доклады о состоянии и охране окружающей среды Ярославской области», рассчитайте ИЗВ для оз. Неро с 2010 г.

$$\text{ИЗВ} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i},$$

где C_i — концентрация компонента (в ряде случаев — значение физико-химического параметра);

n — число показателей, используемых для расчета индекса, $n = 6$;

ПДК_i — установленная величина норматива для соответствующего типа водного объекта.

Для расчета индекса загрязнения вод для всего множества нормируемых компонентов, включая водородный показатель рН, биологическое потребление кислорода БПК₅ и содержание растворенного кислорода, находят отношения $C_i/\text{ПДК}_i$ фактических концентраций к ПДК и полученный список сортируют. ИЗВ рассчитывают строго по шести показателям, имеющим наибольшие значения приведенных концентраций, независимо от того, превышают они ПДК или нет.

Таблица 2

**Показатели качества воды оз. Неро за период 1994–2012 гг.
по приоритетным загрязняющим веществам
(по данным ЯЦГМС)**

Дата	ИЗВ* с 2010 УКИЗВ	Характеристика качества	Приоритетные загрязняющие веще- ства (среднегодовая концентрация в ПДК)
1994 г.	2.9	загрязненная	нефтепродукты (6), медь (5), азот аммонийный (2)
1995 г.	2.5	умеренно загрязненная	нефтепродукты (4), медь (5), БПК ₅ (3), железо (1,8), цинк (1.2), азот аммо- нийный (1), фенолы (1)
1996 г.	2.5	умеренно загрязненная	нефтепродукты (4), медь (4), БПК ₅ (2.5), же- лезо (1–2), азот аммо- нийный (1–2), фенолы (1–2)
1997 г.	2.4	умеренно загрязненная	нефтепродукты (2.4), медь (5), БПК ₅ (2), железо (2.9)
1998 г.	2.3	умеренно загрязненная	нефтепродукты (6,2), медь (2), БПК ₅ (3.1)
1999 г.	3.0	загрязненная IV	нефтепродукты (5.8), медь (4), БПК ₅ (2,6), фенолы (3)
2000 г.	2.2	умеренно загрязненная	нефтепродукты (3,2), медь (4), БПК ₅ (2,3), железо (1,7)
2001 г.	1.9	умеренно загрязненная	нефтепродукты (3.4), медь (3), БПК ₅ (3.3), железо (1)
2002 г.	2.8	загрязненная	нефтепродукты (1.4),

Дата	ИЗВ* с 2010 УКИЗВ	Характеристика качества	Приоритетные загрязняющие веще- ства (среднегодовая концентрация в ПДК)
			медь (6), БПК5 (3.1), железо (2.4), азотнитритный (2.8)
2004 г.	1.4	умеренно загрязненная	медь (1), БПК5 (3.1), азот нитритный (0.5), железо (0.7), азот аммо- нийный (0.9)
2005 г.	5.14	грязная V	аммонийный азот (1.7), азот нитритный (2.5), медь (3.0), нефтепро- дукты (2.8), желе- зо (3.3), БПК5 (2.5)
2006 г.	4.19	грязная V	железо (2.0), БПК5 (3.1), азот аммонийный (3.4), медь (1.7), фенолы (7.5), нефтепродукты (1.1), азот нитритный (0.3)
2010 г.	3.8	По УКИЗВ 3б очень загрязненная	ХПК (3.4), БПК5 (2.8), азот аммонийный (1.3), железо (1.4), медь (3.2), фенолы (1.5)
2011г.	3.9	По УКИЗВ 3б очень загрязненная	ХПК (3.4), БПК5 (2.3), азот аммонийный (1.3), железо (2.3), медь (3.9), фенолы (2.5)
2012г.	3.97	По УКИЗВ 3б очень загрязненная	ХПК (3.6), БПК5 (2.7), азот аммонийный (1), железо (1.6), медь (3.1), фенолы (4.6)
2013 г.			
2014 г.			
2015 г.			

Задание 16. Обобщение результатов анализа состояния экосистемы оз. Неро.

Подведите итоги относительно экологического состояния оз. Неро в современный период. Определите, какие абиотические и биотические факторы являются ключевыми в его функционировании. Сведите в таблицу информацию по выбранным ключевым параметрам (см. табл. 3). Сформулируйте научные задачи, которые необходимо решить при подготовке проекта по его реабилитации. Какие мониторинговые исследования вы бы организовали? Подведите итоги первого и второго этапов деятельности в области прикладной экологии: анализ, исследование. Что вам нужно было сделать? Как вы организовали эту деятельность? В чем оказались сложности? Знания по каким дисциплинам оказались полезными? В чем вам пришлось пойти дальше материала, изученного в университете? Какие навыки и компетенции были охвачены и вновь сформированы в вашей деятельности?

Таблица 3

***Особенности экосистемы озера Неро,
важные с точки зрения его восстановления***

Особенности, благоприятные для восстановления озера	Особенности, не благоприятные для восстановления озера
1. ...	1.

Блок 2

**Изучение принципов и методов восстановления озёр
и научной литературы с примерами проектов
по восстановлению мелководных эвтрофных водоемов**

Используя лекции и дополнительные литературные источники (см. список литературы), изучите принципы и методы восстановления водных экосистем, в частности мелководных эвтрофных озёр. Для сравнения и экстраполяции рассмотрите примеры восстановительных работ на нескольких водоемах, близких по показателям экосистемы к оз. Неро. Работа проводится в парах

или группах, каждая из которых должна представить доклад и презентацию с примером восстановления водоема.

Задание 1. Назовите пять основных принципов восстановления озерных экосистем. Раскройте смысл этих принципов. Какова выработанная на сегодня стратегия восстановления озерных экосистем? Какие экологические законы определяют характер обратимости экосистем?

Задание 2. Приведите четыре основные возможности восстановления поврежденных и деградировавших экосистем. Объясните разницу между восстановлением и реабилитацией. Возможно ли естественное восстановление водоемов? Возможно ли вернуть экосистему к предыдущему трофическому состоянию? Представьте, что с помощью восстановления удалось вернуть абиотические факторы к показателям, предшествующим антропогенному влиянию на систему. Можно ли искусственными методами или с помощью естественной сукцессии добиться воссоздания биоценоза, идентичного существовавшему когда-то в этих условиях? Какие характеристики озер в определенной мере предопределяют экологические особенности водоемов, их трофический статус?

Задание 3. Дайте описание метода *аэрации и оксигенации* гипolimниона. Какие процессы в водоеме он изменяет? Какие ограничения существуют для данного метода? Как технически можно реализовать метод?

Метод *разбавления/вымывания*. Характеристика метода. Какие изменения происходят в озере при его применении? Ограничения для метода.

Удаление донных отложений, или *драгирование*. Опишите технологию метода. Техническая реализация метода. Какие негативные процессы могут развиваться в экосистеме при применении метода? Существующие ограничения для метода. Возможные положительные и отрицательные последствия.

Хемоманипуляция и *активная изоляция дна*. В чем сущность методов, чем они отличаются? Расскажите о способах удаления фосфора с помощью соединений алюминия, железа, кальция, комплекса химикатов (Riplox-метод), глинистых материалов. Какие процессы при этом протекают в воде и донных отложениях?

Назовите условия применимости данных методов. Сравните методы по преимуществам и недостаткам и оцените возможность применения в экосистеме оз. Неро.

Биоманипуляция. Опишите концепцию каскадной трофической цепи и теорию контроля «снизу-вверх» и «сверху-вниз» («bottom-up/top-down theory»). Почему классическая пастбищная трофическая цепь «не работает» при восстановлении гипертрофных водоемов, особенно мелководных? Назовите условия применения метода. Перечислите наиболее часто применяемые мероприятия по биоманипуляции. От чего может зависеть долговременный положительный эффект на качество воды? Возможно ли применение метода для восстановления экосистемы оз. Неро?

Назовите менее распространенные технологии по борьбе с эвтрофированием. Каковы причины, по которым эти методы применяются реже?

Практическое задание 1

Выполните задание 10 из темы 2.

Задание 4. Подберите из электронных источников (см. «Электронные ресурсы ЯрГУ» — информацию на сайте библиотеки <http://lib.uniyar.ac.ru>) статьи с примерами восстановления мелководных эвтрофных водоемов, подготовьте доклад и презентацию по выбранной статье. Поскольку опыт восстановления водоемов в нашей стране, в отличие от западных стран (в Европе более 700 проектов), очень мал, рекомендуется выбрать статью из англоязычного источника (например, издательство *Springer*). Это должны быть полнотекстовые статьи из **научных** журналов, монографий, книг (не из газет и научно-популярных источников, т. к. в них недостаточно первичной информации об экосистемах). При выборе статьи необходимо прежде всего подобрать пример с восстановлением водоема, наиболее близкого по параметрам экосистемы к оз. Неро и расположенного в аналогичном климатическом поясе. В докладе обязательно должно быть представлено: сравнение выбранного водоема (водоемов) и оз. Неро по абиотическим и биотическим показателям (площадь, средняя глубина, водообмен, прозрачность воды, виды и величина биогенной

нагрузки, показатели развития и видовой состав фитопланктона, макрофитов, зоопланктона, бентоса, рыб). Кроме того, необходимо четко показать, какие методы были выбраны для восстановления, какие параметры экосистемы ему предшествовали и какие были достигнуты, скорость реакции водоема на проведенные работы, общие результаты (положительные или отрицательные), насколько оказались достижимы цели, изначально поставленные в проекте. Для иллюстрации доклада можно использовать диаграммы и рисунки из статьи.

Задание 5. Семинарское занятие в форме дискуссии. Обсудить доклады, сделанные по заданию 4, и ответить на вопросы. В чем причины неудачных восстановительных проектов? Правильно ли были поставлены цели и подобраны методы? На основании теоретических знаний и заслушанных докладов с примерами восстановления мелководных эвтрофных водоемов, рассмотреть с экологической и экономической точек зрения, какие из методов восстановления наиболее подходят для реабилитации экосистемы оз. Неро. Какие достоинства и недостатки этих методов вы видите, возможные трудности при их применении? Итогом дискуссии должна быть заполненная таблица (табл. 4) с методами и их оценкой.

Таблица 4

Оценка методов восстановления для реализации в оз. Неро

Метод восстановле- ния	Достоинства метода для реализации в оз. Неро	Недостатки ме- тода для реализации в оз. Неро	Приме- чание
1.			
2.			

Задание 6. Проанализируйте примеры и сделайте обобщение: какие типичные черты эвтрофирования мелководных озер вы можете выделить.

Задание 7. На основании знания общих принципов и методов восстановления водоемов и примеров из статей сформулируйте принципы восстановления мелководных гипертрофных озер.

Блок 3

Подбор методов восстановления оз. Неро исходя из ключевых абиотических и биотических параметров его экосистемы и подготовка собственного проекта по восстановлению оз. Неро

Теоретические знания и изученные примеры восстановления водоемов необходимы для практического подхода к третьему компоненту прикладной экологии — проектированию. Работа проводится в парах или группах, каждая из которых должна написать и представить проект по восстановлению оз. Неро.

Задание 1. Какие научные задачи вы считаете необходимым поставить перед группой, создающей проект восстановления оз. Неро? Достаточно ли данных для создания подобного проекта? Существует ли необходимость в проведении дополнительных исследований экосистемы оз. Неро, если да, то какие бы вы предложили исследования?

Задание 2. Напишите проект восстановления экосистемы оз. Неро, используя один из рассмотренных нами методов или их комплекс.

Проект должен включать в себя следующие части: введение, краткую лимнологическую характеристику оз. Неро, материалы и методы, экологическое обоснование применяемых методов, прогноз, схему мониторинговых наблюдений (станции, параметры, временной интервал наблюдений), заключение.

Продумайте, когда необходимо проводить мониторинг: до, во время или после реализации проекта? Экстраполируйте, насколько это возможно, методы и опыт восстановления мелководных эвтрофных озер из примеров, рассмотренных нами в ходе курса.

Блок 4

Анализ существующего проекта по реабилитации оз. Неро, оценка методов, прогноз результатов.

Занятия проводятся с помощью метода «case-study» («метод кейсов»), основанного на моделировании ситуации или использовании реальной ситуации из научной деятельности в целях анализа данного случая, выявления проблем, поиска альтернативных решений и принятия оптимального решения проблем. Студенты должны проанализировать ситуацию, разобраться в сути проблем, предложить возможные решения и выбрать лучшее из них. Кейсы базируются на реальном фактическом материале или же приближены к реальной ситуации. В нашем случае кейсом является сборник документов «Комплексная экологическая реабилитация озера Неро в Ростовском районе Ярославской области».

Задание. Прочитать проект «Комплексная экологическая реабилитация озера Неро в Ростовском районе Ярославской области» и написать по нему заключение. Можно ли реализовывать программу реабилитации? Какие замечания у вас возникли? Соответствуют ли выбранные методы поставленным целям? Сделайте прогноз — возможно ли достижение поставленных программой целей? Отметьте сильные и слабые стороны проекта. Какие последствия (положительные и отрицательные) запланированных методов вы можете спрогнозировать?

Контрольные вопросы по теме

1. История природоохранной деятельности России.
2. Некоторые положения системно-структурного анализа.
3. Правило выделения систем.
4. Свойства системы.
5. Организация и самоорганизация.
6. Основные положения стратегического управления.
7. Понятие фирмы и конкуренции, источники конкурентных преимуществ.

8. Административная, ситуационная и стратегическая модель управления.

9. Понятие стратегии по Ефремову (1998), Квину (1980) 5П по Минцбергу (1987).

10. SWOT- и REST-анализы при выработке стратегии фирмы, работающей в области природоохранной деятельности.

11. Стратегическое планирование природоохранной деятельности.

12. Три блока деятельности в прикладной экологии. Определения, подходы.

13. В чём заключается анализ при проведении экологических проектов?

14. Цели и этапы экологического исследования и экологического проектирования.

15. Особенности экологического производства.

16. Экологическое управление.

Восстановление водоемов

17. Принципы и стратегия восстановления озерных экосистем.

18. Экологические законы, определяющие возможность восстановления экосистем.

19. Основные возможности восстановления поврежденных и деградировавших экосистем.

20. Параметры оценки состояния озерных экосистем: физико-химические, морфометрические, биотические (бактериопланктон, фитопланктон, макрофиты, зоопланктон, бентос, рыбы).

21. Предлагаемые Н. М. Мингазовой принципы восстановления озер и схема процессов восстановления состояния водной экосистемы.

22. Концепция биогенной нагрузки. Внутренняя и внешняя нагрузка.

23. Методы восстановления озер: аэрация и оксигенация гипolimниона, разбавление/вымывание, удаление донных отложений или драгирование. Условия применимости данных методов, преимущества и недостатки.

24. Методы хемоманипуляции и активной изоляции дна. Условия применимости методов, преимущества и недостатки.

25. Биоманипуляция. «Top-down» и «bottom-up» модели.
26. Менее распространенные методы восстановления.
27. Суть концепции биогенной нагрузки Р. Фолленвайдера.

Практические вопросы по экосистеме оз. Неро

28. Экосистема оз. Неро как объект для восстановления. Абиотические факторы. Морфометрия. Гидрология. Гидрохимия.
29. Экосистема оз. Неро как объект для восстановления. Бактериопланктон. Фитопланктон.
30. Экосистема оз. Неро как объект для восстановления. Высшая водная растительность. Динамика в XX–XXI вв.
31. Экосистема оз. Неро как объект для восстановления. Зоопланктон. Зообентос. Ихтиофауна.
32. Возможные пути оздоровления экосистемы оз. Неро.
33. «Bottom-up» контроль. Положительные и отрицательные стороны добычи сапропеля для экосистемы оз. Неро.
34. Возможности метода «top-down» контроля для оз. Неро.
35. Возможные методы биоманипуляции (изъятие и вселение рыб) для оз. Неро.
36. Методы аэрации, возможности применения для оз. Неро.
37. Методы хемоманипуляции, возможности применения для оз. Неро.
38. Возможные методы биоманипуляции в системе «фитопланктон — макрофиты» для оз. Неро. Влияние уровня оз. Неро на зарастаемость макрофитами.
39. Достоинства и недостатки проекта «Комплексная экологическая реабилитация озера Неро в Ростовском районе Ярославской области».

Рекомендуемая литература

Основная

1. Драбкова, В. Г. Восстановление экосистем малых озер / В. Г. Драбкова, М. Я. Прыткова, О. Ф. Якушко. — СПб. : Наука, 1994. — 144 с.
2. Отчет о научно-исследовательской работе «Оценка современного состояния озера Неро в Ростовском муниципальном округе Ярославской области. Рукопись. — Ярославль, 2011. — 103 с.
3. Поярков, Б. В. Стратегическое планирование природоохранной деятельности : курс лекций / Б. В. Поярков ; отв. ред. Л. С. Леонтьева. — Ярославль : ЯГУ, 2002. — 203 с.
4. Современное состояние экосистемы оз. Неро. — Рыбинск : Ин-т биологии внутр. вод, 1991. — 87 с.
5. Состояние экосистемы высокопродуктивного озера Неро в начале XXI века. — М. : Наука, 2008. — 406 с.
6. Гидрология и гидрохимия оз. Неро / Э. С. Бикбулатов, Е. М. Бикбулатова, А. С. Литвинов, С. А. Поддубный. — Рыбинск : Рыбинский дом печати, 2003. — 192 с.

Дополнительная

1. Результаты мониторинга планктонного сообщества оз. Неро / О. В. Бабаназарова, О. А. Ляшенко, В. И. Лазарева, Л. Е. Сигарева, А. А. Зубишина, Д. Холт, С. М. Смирнова, С. И. Сиделев, О. Е. Калинина // Экологические проблемы уникальных природных и антропогенных ландшафтов : материалы Всероссийской научно-практической конференции. 15–17 декабря 2004 г. — Ярославль, 2004.
2. Бабаназарова, О. В. Структура фитопланктона и динамика содержания биогенных элементов в озере Неро / О. В. Бабаназарова // Биология внутренних вод. — 2003. — № 1. — С. 31–39.
3. Гладышев, М. И. Биоманипуляция как инструмент управления качеством воды в континентальных водоемах / М. И. Гладышев // Биология внутренних вод. — 2001. — № 2. — С. 3–15.
4. Даценко, Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты / Ю. С. Даценко. — М. : ГЕОС, 2007. — 252 с.

5. Китаев, С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов / С. П. Китаев. — Петрозаводск : КНЦ РАН, 2007. — 395 с.
6. Мингазова, Н. М. Антропогенные изменения и восстановление экосистем малых озер (на примере Среднего Поволжья) / Н. М. Мингазова. — СПб. : Институт озероведения РАН, 1999.
7. Науменко, М. А. Эвтрофирование озер и водохранилищ : учеб. пособие / М. А. Науменко. — СПб. : РГГМУ, 2007. — 100 с.
8. Прыткова, М. Я. Научные основы и методы восстановления озерных экосистем при разных видах антропогенного воздействия / М. Я. Прыткова. — СПб. : Наука, 2002. — 148 с.
9. Румянцев, В. А. Проблемы и пути восстановления умирающих озер / В. А. Румянцев, В. Г. Драбкова, С. А. Кондратьев // Вода и экология. — 2000. — № 2. — С. 70–74.
10. Хендерсон-Селлерс, Б. Дестратификация как инструмент рационального водопользования / Б. Хендерсон-Селлерс // Инженерная лимнология. — Л. : Гидрометеиздат, 1987. — С. 281–303.
11. Хендерсон-Селлерс, Б. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования / Б. Хендерсон-Селлерс, Х. Р. Маркленд. — Л. : Гидрометеиздат, 1990. — 487 с.
12. Экологический атлас Ярославской области / отв. ред. Г. А. Фоменко. — Ярославль, 2015. — 154 с.
13. Babanazarova, O. V. Inferring long-term changes in the physical-chemical environment of the shallow, enriched lake Nero from statistical and functional analyses of its phytoplankton / O. V. Babanazarova, O. A. Lyashenko // J. Plankton Res. — 2007. — V. 29. № 9. — P. 747–756.

Оглавление

Тема 1. Эвтрофирование водоемов: причины и последствия.	
Концепция биогенной нагрузки.....	3
Контрольные вопросы по теме.....	12
Рекомендуемая литература.....	14
Тема 2. Трофическая структура водных экосистем.	
Теория динамики пищевых цепей	16
Контрольные вопросы по теме.....	28
Рекомендуемая литература.....	29
Тема 3. Восстановление водных экосистем	31
Контрольные вопросы по теме.....	51
Рекомендуемая литература.....	54

=====

Учебное издание

Сиделев Сергей Иванович
Зубишина Алла Александровна
Бабаназарова Ольга Владимировна

Водные экосистемы
(функционирование,
антропогенные изменения,
восстановление)

Учебно-методическое пособие

Редактор, корректор М. Э. Левакова
Верстка М. Э. Леваковой

Подписано в печать 22.06.16. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 4 экз. Заказ

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе ЯрГУ

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова.
150000, Ярославль, ул. Советская, 14.