

22. Строгонова, Л.Н. К вопросу об экологическом состоянии поверхностных и атмосферных вод г. Воронежа / Л.Н. Строгонова // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 2001. – № 11. – С. 263–267.

23. Спиридонов, Е.Г. Контроль качества приземного слоя атмосферы и оценка его влияния на здоровье населения (на примере г. Воронежа) : автореф. канд. дис. / Е.Г. Спиридонов. – М. : Гос. ун-т по землеустр., 2000. – 24 с.

УДК 574.633:504.064.36(470.3)

## **БИОИНДИКАЦИЯ В ГЕОЭКОЛОГИИ: ОБ ЭВТРОФИРОВАНИИ МЕЖЛЕДНИКОВЫХ, ГОЛОЦЕНОВЫХ И СОВРЕМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ БАССЕЙНА ВЕРХНЕГО ДОНА**

**Г.А. Анциферова**

*Воронежский государственный университет*

На основе исследования видового и количественного состава фитопланктона водных экосистем бассейна Верхнего Дона проведено сопоставление процессов эвтрофирования поверхностных вод региона в условиях межледниковий, голоцена и в современную эпоху. В межледниковое время и в голоцене эвтрофирование отражало природную эволюцию слабо проточных и непроточных водоемов, а также процессы, происходившие на водосборах. Эвтрофирование современных водных экосистем является следствием их антропогенного загрязнения.

Целью работы является сопоставление процессов эвтрофирования поверхностных вод бассейна Верхнего Дона в условиях межледниковий, голоцена и в современную эпоху.

В межледниковое время и в голоцене эвтрофирование отражало природную эволюцию слабо проточных и непроточных водоемов, а также процессы, происходившие на водосборах. В бассейне Верхнего Дона на территории краевой зоны распространения донского оледенения, существовавшего около 500 тысяч лет тому назад, во время последовавшего затем мучкапско-межледниковья закладывались и развивались озера. В основном это были глубокие (до 30–60 м) и среднеглубокие (до 15–25 м) водоемы, с котловинами экзарационно-аккумулятивного происхождения. На основе данных диатомового анализа древнеозерных осадков прослежена последовательная смена крупных этапов трофности озер, некоторые из которых существовали в течение всего межледниковья. Озеро с олиготрофным режимом, с низким уровнем продуктивности становилось мезотрофным и затем эвтрофным со средним и высоким уровнями трофности. В этап, завершающий существование водоема, возможно также развитие процессов его дистрофирования, что прослежено на примере ряда озер. Основной особенностью экосистем с замедленным водообменом является накопление в их котловинах автохтонного и аллохтонного органического и минерального вещества. Это приводило к зарастанию и заболачиванию водоема.

В последующие лихвинскую, микулинскую межледниковые эпохи и в голоцене регион располагался вне границ предшествующих им окского и московского (днепровского) оледенений. Для подобных

территорий характерны озера, которые развиваются в унаследованных понижениях рельефа, но в основном они имеют старичное происхождение. Трофность таких водоемов имеет изначально более высокие показатели, по сравнению с озерами ледникового происхождения, в данном случае с мучкапскими. Это были неглубокие водоемы (первые метры, максимальные глубины до 5–10 м), мезотрофные с признаками эвтрофирования или эвтрофные. Время существования подобных озер ограничивалось размерами озерной котловины и скоростью ее заполнения осадками. В бассейне Верхнего Дона изучены озерные мергели микулинского возраста (130 тысяч л.т.н.), мощностью до 1 м, вскрытые в пойме Дона у хутора Ямань, и озерные отложения голоцена в разрезах Гаврило-86 (радиоуглеродная датировка 8270–8370 л.т.н.), мощностью около 3 м, и Шкурлат-ГК-6 (радиоуглеродная датировка около 4500 л.т.н.), мощностью 0,9 м. Трофность данных озер определена на основе материалов, полученных в результате изучения сообществ диатомовых водорослей. Учитывая видовой состав и оценки обилия отдельных форм, в том числе доминирующих, а также совокупность экологических характеристик: соотношения групп диатомей по местообитанию и географическому распространению, по отношению к степени минерализации вод, активной реакции среды (рН) были восстановлены глубины, минерализация, рН и трофность. Характерные для эвтрофных межледниковых и голоценовых водоемов виды диатомовых водорослей приведены в табл. 1.

Эвтрофирование природных водных экосистем (межледниковых, голоценовых) является следствием их эволюции и определяется процессами образования и деструкции органического вещества. Водная эко-

**Доминирующие и субдоминирующие виды диатомовых водорослей в сообществах фитопланктона и микрофитобентоса межледниковых и голоценовых озер**

Режим трофности	Доминирующие и субдоминирующие планктонные диатомеи	Доминирующие и субдоминирующие диатомеи обрастаний и донные
Эвтрофный	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> , <i>S. hantzschii f. tenuis</i> , <i>S. rotula</i> , <i>Aulacoseira granulata et var. angustissima</i> , <i>A. italica et var. tenuissima</i> , <i>A. islandica et subsp. helvetica</i> , <i>Melosira varians</i> , <i>Cyclotella meneghiniana</i>	<i>Fragilaria brevistriata</i> с разновидностями, <i>F. construens</i> , <i>F. construens var. venter</i> , <i>F. construens var. binodis</i> , <i>F. pinnata</i> , <i>Ophephora martyi</i> с разновидностями. Разнообразные виды родов <i>Navicula</i> ( <i>N. oblonga</i> , <i>N. radiosa</i> , <i>N. tuscula</i> , <i>N. hungarica</i> с разновидностями, <i>N. cryptocephala</i> др.), <i>Cymbella</i> ( <i>C. cymbiformis</i> , <i>C. cesatii</i> , <i>C. microcephala</i> , <i>C. diluviana</i> , <i>C. ehrenbergii</i> , <i>C. ventricosa</i> , <i>C. turgida</i> ), <i>Amphora A. ovalis</i> с разновидностями), <i>Gomphonema</i> ( <i>G. augur</i> , <i>G. constrictum</i> , <i>G. intricatum et var. pumilum</i> ), <i>Gyrosigma</i> ( <i>G. acumanatum</i> , <i>G. attenuatum</i> ), <i>Epithemia</i> ( <i>E. sorex</i> , <i>E. turgida</i> с разновидностями, <i>E. zebra</i> с разновидностями, <i>E. intermedia</i> ), <i>Rhopalodia</i> ( <i>R. gibba et var. ventricosa</i> ) и мн. др.
Дистрофный		<i>Fragilaria construens var. venter</i> и <i>F. construens var. binodis</i> , часто мелкие формы и с морфологическими отклонениями в строении створок

система, обладающая сбалансированностью этих процессов, характеризуется разнообразием населяющих ее организмов, сложными пищевыми связями, многочисленными энергетическими путями, низкой энтропией. Это обуславливает высокие защитные свойства экосистемы, в первую очередь на уровне эффективности процессов самоочистки. В каждом водоеме процесс эвтрофирования развивается в направлении увеличения объема органического вещества. В начале процесса, до определенного уровня, сохраняется равновесие между их объемом и гидробионтами. Нарушение этого равновесия происходит по мере отставания деструкционных процессов от продукционных. Начало интенсивного накопления органического вещества провоцирует смещение соотношения абиотической и биотической составляющих экосистемы, возрастание темпов осадконакопления. С течением времени уровень эвтрофирования еще более усиливается, поскольку с накоплением осадков глубина водоема и его площадь уменьшаются. Сопоставление данных диатомового и спорово-пыльцевого анализов, применяемых при изучении древнеозерных осадков, показывает, что изменения уровня трофности связано с состоянием водосборных площадей (климат, ландшафты).

Проблемы классификации водоемов по трофности, эвтрофирование голоценовых и современных озер являются актуальными. Им посвящены работы Л.Л. Россоломо, Н.Н. Давыдовой, В.Г. Дробковой, Н.А. Петровой и других, в частности, на примере озер Северо-Западных районов России, Западной Европы и Северной Америки [1, 2, 3, 4, 5]. Это согласуется с представлениями об изменениях режимов трофности и эвтрофировании межледниковых водоемов [6, 7].

Изучение процессов эвтрофирования современных водных экосистем чрезвычайно актуально. Антропогенное воздействие на поверхностные водные объекты осуществляется повсеместно. Применяемый термин «антропогенное эвтрофирование» часто используется как синоним понятия «антропогенное загрязнение». Состояние поверхностных вод (водотоков и водоемов) в полной мере отражает общую экологическую обстановку, формирующуюся на водосборных площадях.

В европейской части России бассейн Верхнего Дона является крупным густонаселенным промышленным и сельскохозяйственным регионом с соответствующими транспортными, энергетическими и коммунальными коммуникациями. Основными источниками поступления загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты повсеместно являются диффузный сток с бассейна водосбора и атмосферный перенос. В пределах городских и сельских населенных пунктов, различных промышленных и агропромышленных объектов на фоне этого первостепенное значение приобретают загрязненные промышленные и коммунально-бытовые стоки.

На основе биоиндикационных исследований была проведена оценка эколого-биологического состояния водных экосистем бассейна Верхнего Дона. Изучены сообщества фитопланктона и микрофитобентоса основной водной артерии региона – р. Дон и некоторых его крупных притоков – рек Черная Калитва, Богучарка, Хопер и др. и р. Цна и ее приток р. Челновая, террасовые и пойменные озера долины Хопра и ряд крупных водохранилищ – Воронежское, Тамбовское и др.

Проточные, непроточные и слабопроточные водные экосистемы региона – природные (реки, озера)

и природно-антропогенные (водохранилища), соответствующим трофическому статусу эвтрофных. Степень эвтрофикации вод обусловлена количеством биогенных веществ, главным образом азота, фосфора, железа, микроэлементов и органических веществ. С увеличением степени эвтрофирования ухудшается качество среды обитания гидробионтов. При перегрузке водоемов биогенными веществами происходит бурное развитие планктонных водорослей, вызывающих «цветение» вод. Прозрачность воды уменьшается вследствие большого объема взвешенного в воде органического вещества (планктонные организмы, детрит). Прибрежная зона таких водоемов зарастает высшей водной растительностью, часто заболачивается. Интенсивное развитие растений сопровождается накоплением в придонных слоях органического вещества в результате неполной его минерализации. Происходит накопление толщи донных илов. В придонных слоях возникает дефицит кислорода, что предопределяет процессы анаэробного брожения.

Современные озера бассейна Верхнего Дона являются террасовыми и пойменными. В основном это старицы, которые формируются в результате прорывов меандров. Обычно они быстро заполняются терригенными отложениями во время половодий и паводков, особенно когда располагаются на поверхности надпойменных террас. Детально такие водоемы изучены в пойме р. Хопер на территории Хоперского природного заповедника. Это эвтрофные мелководные (от 0,5–1,5 м до 3–6 м) водоемы.

Видовой состав сообществ диатомовых и синезеленых водорослей, показанный на примере оз. Большое Щурячье, представляет их сообщества в террасовых и пойменных озерах региона. Соответственно видовой состав сообществ Воронежского водохранилища в целом характерен для большинства крупных водохранилищ региона (Тамбовское, Челновское, Котовское в Тамбовской области) (табл. 2). Приведенные в таблице виды, доминирующие и субдоминирующие в сообществах низших водорослей, по своему значению являются видами-индикаторами антропогенного загрязнения.

В регионе происходит эвтрофирование вод речных экосистем. Это явление достоверно фиксируется видовым составом сообществ фитопланктона и их структурой в течение вегетационного периода (табл. 3). Показатели средней биомассы достигают от 5,1 до 10 мг/л, численности – до 10–12 млн кл./л, что характеризует речные экосистемы Воронежской и Тамбовской областей как эвтрофные.

Процесс эвтрофикации сопровождается трансформацией фитопланктона рек из реофильного (речно-го) в лимнофильный (фитопланктон озер и водохранилищ). Это связано с общим заилением рек, и в первую очередь акватории Дона. Дон обследован на протяжении более 400 км вниз по течению, от с. Малышево до с. Белая Горка. Наиболее активно процесс заиления проявляется в районе г. Нововоронежа (НВ АЭС).

Таблица 2

**Доминирующие и субдоминирующие виды диатомовых и синезеленых водорослей в сообществах фитопланктона и микрофитобентоса слабопроточных и непроточных водных экосистем**

Вегетационный период	Диатомовые водоросли		Синезеленые водоросли	
	Доминанты	Субдоминанты	Доминанты	Субдоминанты
<b>ВОРОНЕЖСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ</b>				
Конец апреля – начало июня	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> <i>Nitzschia acicularis</i>	<i>Navicula viridula</i>	<i>Ostillatoria planctonica</i>	
Июнь – середина августа	<i>Diatoma vulgare et var. producta var. erhenbergii et var. linearis</i> <i>Rhoicosphenia curvata</i>	<i>Navicula viridula</i>	<i>Microcystis aeruginosa</i>	<i>Microcystis pulverea</i> <i>Anabaena flos-aquae</i> <i>Ostillatoria limnetica</i> <i>O. limosa, O. princeps</i>
Конец августа – сентябрь	<i>Diatoma vulgare et var. producta et var. ehrnvergi D. elongatum</i> <i>Rhoicosphenia curvata</i>	<i>Cocconeis pediculus</i> <i>Gomphonema parvulum</i> <i>G. olivaceum</i>	<i>Microcystis aeruginosa</i> <i>Ostillatoria limnetica</i> <i>O. limosa</i> <i>O. princeps</i>	
<b>ХОПЕРСКИЙ ПРИРОДНЫЙ ЗАПОВЕДНИК, оз. Большое Щурячье</b>				
Конец мая – начало июня	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> <i>Nitzschia acicularis</i>		<i>Dactylococcopsis acicularis</i>	
Конец июня – июль	<i>Epithemia sorex et var. gracilis</i> <i>Navicula hungarica var. capitata</i>	<i>Amphora ovalis et var. libyca et var. gracilis</i>	<i>Lyngbya amplivaginata</i> <i>Pleurocapsa minor</i>	<i>Ostillatoria planctonica</i>
Август – начало сентября	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	<i>Stephanodiscus rotula</i> <i>Navicula hungarica var. capitata</i>	<i>Dactylococcopsis acicularis</i>	
Конец сентября	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>		<i>Microcystis pulverea var. parasitica</i>	<i>Microcystis pulverea et var. incerta</i>

**Качественный и количественный состав фитопланктона  
рек Дон, Черная Калитва, Челновая, Цна в вегетационный период 2003 г.**

Вегетационный период	Характерные виды сообществ	Средняя биомасса, (диатомеи и синезеленые) мг/л	Численность, млн кл./л
р. Дон			
Весна (май – начало июня)	<i>Stephanodiscus Hantzschii, Aulacoseira ambigua, Tabellaria flocculosa, Asterionella formosa, Synedra capitata</i>	10,0	до 10
Лето (конец июня – середина августа)	<i>Aulacoseira italica et var. tenuissima, A. granulata, Cocconeis placentula, C. pediculus, Navicula cryptocephala, N. gracilis, Fragillaria crotonensis, Synedra tabulata, Microcystis pulverea</i> с разновидностями	5,1–6,0	более 10
Осень (конец августа – октябрь)	<i>Stephanodiscus Hantzschii, Aulacoseira granulata, Synedra ulna</i> с разновидностями, <i>Cocconeis placentula, Nitzschia acicularis, Navicula cryptocephala, N. gracilis, N. radiosa, Fragillaria crotonensis, Microcystis pulverea</i> с разновидностям	5,1–8,0	до 10
р. Черная Калитва			
Весна (май – начало июня)	<i>Stephanodiscus Hantzschii, Tabellaria flocculosa, Asterionella formosa, Synedra capitata, S. tabulata, Fragillaria crotonensis, Microcystis pulverea</i> с разновидностями	8,5	до 10
Лето (конец июня – середина августа)	<i>Aulacoseira italica et var. tenuissima, A. granulata, Cocconeis placentula, Melosira varians, Rhoicosphenia curvata, Navicula cincta, N. cryptocephala, N. gracilis, Fragillaria crotonensis, Synedra ulna</i> с разновидностями, <i>Microcystis pulverea</i> с разновидностями	5,1–6,0	до 10
Осень (конец августа – октябрь)	<i>Cocconeis placentula, Nitzschia acicularis, Navicula cincta, N. cryptocephala, N. gracilis, N. radiosa, Synedra ulna, Microcystis pulverea</i> с разновидностями	5,1–8,0	до 10
р. Челновая			
Весна (май – начало июня)	<i>Stephanodiscus Hantzschii, Tabellaria flocculosa, Asterionella formosa, Synedra capitata, Fragillaria crotonensis</i>	8,0	до 10
Лето (конец июня – середина августа)	<i>Aulacoseira italica et var. tenuissima, A. granulata, Cocconeis placentula, C. pediculus, Melosira varians, Diatoma vulgare, D. vulgare var. producta, Navicula cincta, N. cryptocephala, N. gracilis, Nitzschia acicularis, Synedra ulna</i> с разновидностями, <i>Microcystis pulverea</i> с разновидностями, <i>Ostillatoria planctonica</i>	8,0–10,0	10–12
Осень (конец августа – октябрь)	<i>Stephanodiscus Hantzschii, Aulacoseira granulata, Nitzschia acicularis, Synedra ulna, Cocconeis placentula, C. pediculus, Diatoma vulgare, D. vulgare var. producta</i>	5,1–6	до 10
р. Цна			
Весна (май – начало июня)	<i>Stephanodiscus Hantzschii, Tabellaria flocculosa, Asterionella formosa, Synedra capitata, Fragillaria crotonensis</i>	8,0	до 10
Лето (конец июня – середина августа)	<i>Aulacoseira italica et var. tenuissima, A. granulata, Cocconeis placentula, C. pediculus, Melosira varians, Diatoma vulgare, D. vulgare var. producta, Navicula cincta, N. cryptocephala, N. gracilis, Nitzschia acicularis, Synedra ulna</i> с разновидностями, <i>Microcystis pulverea</i> с разновидностями, <i>Ostillatoria planctonica</i>	5,1–10,0	более 10
Осень (конец августа – октябрь)	<i>Stephanodiscus Hantzschii, Aulacoseira granulata, Nitzschia acicularis, Synedra ulna, Cocconeis placentula, C. pediculus, Diatoma vulgare, D. vulgare var. producta</i>	6,0	до 10

Практически повсеместно и в течение всего вегетационного периода в пробах фитопланктона Дона наблюдаются виды синезеленой водоросли рода *Microcystis*, с оценками обилия от 4 (часто) до 6 (в массе) баллов. Их присутствие в настоящее время можно рассматривать как фоновое. Но в конце 80-х годов XX столетия в фитопланктоне р. Дон данная водоросль не наблюдалась. Очевидно, что это тревожный сигнал, показывающий, что произошло нарушение природных связей в сообществах фитопланктона реки. В настоящее время при благоприятных температурных условиях представители данного рода синезеленой водоросли обуславливают «цветение» вод в озерах и водохранилищах. В регионе формируется природно-антропогенный состав сообществ фитопланктона загрязненных местообитаний. В ненарушенных сообществах, например в ряде озер Хоперского природного заповедника, часто находящихся вне пределов непосредственного воздействия хозяйственной деятельности человека, синезеленые водоросли разнообразны в видовом отношении и отдельные виды достигают высоких оценок в условиях непосредственных местообитаний. Следует заметить, что в большинстве своем данные виды синезеленых водорослей в загрязненных водоемах не наблюдаются. Основные аспекты исследования эвтрофных водных экосистем на основе сообществ низших водорослей объединены в табл. 4.

Видовое разнообразие сообществ низших водорослей в проточных эвтрофных и в слабо проточных и непроточных высоко эвтрофных водных экосистемах невелико. Сообщества диатомовых водорослей в озерных водоемах, т.е. лимнофильные, более богаты в видовом отношении, чем в реках (реофильные). Это связано с большим разнообразием озерных биотопов. Для оценки деградации видового состава современных сообществ в условиях повсеместного антропогенного эвтрофирования водоемов, названной дефицитом видов (по Коте, 1962 [8]), проведено их сопоставление с сообществами диатомей, развивающимися в экологически чистых водоемах (табл. 5).

Как показало исследование видового разнообразия сообществ низших водорослей пойменных и террасовых озер долины р. Хопер в пределах Хоперского природного заповедника, они также находятся под воздействием антропогенного загрязнения. Вероятно, подобный уровень загрязнения следует рассматривать как фоновый, присущий европейской части России в целом. Общее видовое разнообразие сообществ диатомей озер Хоперского заповедника, по данным проведенной нами в 80-х годах инвентаризации, составляет 306 видов и внутривидовых таксонов. Эти данные использованы для контроля при оценке дефицита видов в современных водоемах, находящихся в условиях хозяйственной нагрузки различного уровня. Одним из частных объяснений относительной чистоты пойменных озер является тот фактор, что в весеннее половодье котловины большинства пойменных озер промываются паводковыми потоками. Но несмотря на это, антропогенная нагрузка такова, что наблюдается «цветение» вод отдельных озер синезелеными водорослями, например в оз. Большое Щурячье, имеющем глубину до 2–3 м. В нем дефицит видов составляет 64,7 %, наименьший по исследованным водоемам. Обращают на себя внимание водоемы, в которые поступают органические загрязнения (выпас скота, гусей), в них число видов диатомей падает до 2–14 (озера Нехаево, Донцово).

Голоценовое озеро, которое существовало в пойме р. Гаврило 4,5 тыс. лет тому назад, выбрано для контроля при определении дефицита видов в современном водоеме, расположенном на той же территории, в районе Павловского ГОКа. Дефицит видов составил 90,6 %. Сообщества диатомовых водорослей р. Дон сопоставлялись с сообществами эвтрофной старицы р. Дон у х. Ямань, которая развивалась во времена микулинского межледникового (240 видов).

Обращает на себя внимание не только низкое видовое богатство сообществ фитопланктона и микрофитобентоса, но также их единообразие, монотонность. Число видов в пробах фитопланктона рек и водохранилищ постоянно, оно колеблется от 8–10 до 21. Максимальное их число наблюдается у г. Нововоронежа выше НВ АЭС – 33 вида, где обследован песчаный пляж, с топким, заиленным дном. Вдоль берега распространены обширные заросли разнообразной высшей водной растительности. Сравнение с контрольным объектом показывает повсеместный дефицит видов по р. Дон от 86,3 до 96,7 %.

В ряду крупных водохранилищ региона детально изучен видовой состав Воронежского водохранилища (см. табл. 2). Выявленный комплекс диатомей в целом насчитывает 187 видов и внутривидовых таксонов, синезеленых водорослей – 48 видов и форм. Видовой состав сообществ фитопланктона Челновского, Тамбовского и Котовского водохранилищ имеет сходство с Воронежским водохранилищем. В условиях локального увеличения загрязнения, выявляемого, например, в местах выпуска неочищенных ливневых и канализационных вод (Воронежское и Тамбовское водохранилища), происходит исчезновение диатомовых водорослей, наблюдается «цветение» вод синезелеными водорослями, в составе которых также развиваются лишь 1–2 вида, характерные для загрязненных местообитаний.

Таким образом, в структуре сообществ низших водорослей прослеживается следующая закономерность: общее низкое число видов при увеличении численности отдельных видов. Повсеместно доминируют 1–2 вида, способные к быстрому популяционному росту (например, виды *Diatoma vulgare*, *Aulacoseira granulata*, *A. italica*). Систематический и экологический состав сообществ низших водорослей в течение вегетационного периода единообразен, в том числе и сукцессионный (смена состава сообществ в течение сезона весна – лето – осень). Наблюдаются виды и внутривидовые таксоны широкого экологического и географического диапазона распространения, характерные для эвтрофных водоемов Европы в целом.

**Основные показатели исследования эвтрофных межледниковых и голоценовых (озера) и современных (реки, озера, водохранилища) водных экосистем на основе сообществ фитопланктона и микрофитобентоса**

Показатели исследования	Время существования объектов исследования – водных экосистем	
	Межледниковая эпоха, голоцен	Современная эпоха
Тип водных экосистем	Природные	Природные – реки, озера Природно-антропогенные – озера и водохранилища
Типы водоемов, подвергающихся эвтрофированию	Слабопроточные и непроточные – озера	Проточные – реки, слабопроточные и непроточные – озера и водохранилища
Процесс эвтрофирования	Природный	Природно-антропогенный
Тип сообществ фитопланктона и микрофитобентоса	Природные (не нарушенные)	Природно-антропогенные (нарушенные антропогенным (техногенным) воздействием)
Стадии эвтрофирования – дистрофирование	Эвтрофный – высокоэвтрофный – дистрофный	Эвтрофный – высокоэвтрофный – гиперэвтрофный – дистрофный
Методы изучения степени эвтрофирования	Анализ видового состава и соотношения видов по местообитанию, экологических характеристик видов диатомовых водорослей с привлечением данных палинологического метода для оценки состояния водосборов	Анализ видового разнообразия сообществ фитопланктона и микрофитобентоса (диатомовые и синезеленые водоросли) и оценок обилия отдельных видов. Сапробиологический анализ на основе суммы баллов валентной сапробности, индекса сапробности Пантле-Букка в модиф. Сладчека, показателей биомассы и численности фитопланктона
Регулирование эвтрофирования водной экосистемы	Природной – переход на более высокий уровень трофности необратим	Природной и природно-антропогенной – а) следует общим закономерностям эволюции трофности и б) повышение степени эвтрофирования можно замедлить, ограничивая загрязнение водных объектов
Экологический прогноз	Заполнение озерной котловины осадками, ее заболачивание, осушение. Продолжительность процесса – столетия и тысячелетия	Эвтрофная экосистема (класс качества вод – «умеренно загрязненные») с самостоятельно протекающими процессами самоочищения – стадия обратимых изменений. Процесс эвтрофирования – при соблюдении природоохранных мероприятий продолжительный. Экологический прогноз – положительный. При классе качества вод «сильно загрязненные» процессы самоочищения водоема подавлены – пороговая стадия, при переходе через которую (класс вод «весьма загрязненные» и «сильно загрязненные») – следует стадия необратимых изменений. Продолжительность процесса – десятки лет, годы. Экологический прогноз – отрицательный.

**Сопоставление видового разнообразия сообществ низших водорослей  
в водоемах бассейна Верхнего Дона – ископаемых (микулинское межледниковье и голоцен)  
и современных**

Контрольный объект (станция)			Обследуемая станция		Дефицит видов (в %) $A_F = (A_a - A_x / A_a) \times 100 \%$ , где $A_a$ – число видов на контрольной станции, $A_x$ – число видов на обследуемой станции (по Коте, 1962: [8])
Водоем	Время развития	Кол-во видов	Современный водоем, место отбора пробы фитопланктона	Кол- во видов	
р. Дон эвтрофн. старица у х. Ямань	Микулин. межледн. (130 тыс.л.н.)	240	р. Дон, г. Нововоро- неж, выше НВАЭС	33	86,3
Тот же	-«-	240	р. Дон, с. Сторожевое ниже НВАЭС	8	99,3
Тот же	-«-	249	р. Дон, с. Новая Калитва, ниже впадения р. Черная Калитва	13	94,6
Тот же	-«-	240	р. Дон, с. Белая Горка (на юге Воронеж. обл.)	20	91,7
Эвтрофн. озеро в пойме р. Гаврило (Павловский ГОК)	Голоцен (4,5 тыс.л.н.)	320	Эвтрофное озеро в пойме р. Гаврило (левый приток р. Дон (Павловский ГОК)	30	90,6
ХГЗ, пойменные и террасовые эвтрофн. озера долины р. Хопер (Общее число видов)	Ныне	306	оз. Б. Щурячье в пойме р. Хопер, вне хоз. деятельности	108	64,7
-«-	-«-	306	оз. Нехаево (деревня на берегу)	14	95,4
-«-	-«-	306	оз. Донцово «цветение» вод синезел. рода Arhanozomenon (стоки животновод. хозяйств, активный выпас гусей, отсут- ствует высшая водная растительность)	2	99,3

Эвтрофикация и загрязнение вод приводят к увеличению сапробности. Она показывает экологическое состояние любого водоема в зависимости от количества и активности разлагающегося органического вещества автохтонного и аллохтонного происхождения и оценивается по способности организмов развиваться в воде с различными величинами содержания органических загрязнений. Воды пресных водоемов по видам-индикаторам разделены на четыре зоны сапробности, характеризующие обстановку, в которой происходят процессы очищения загрязненных вод.

Виды диатомовых и синезеленых водорослей, изученные в водах региона, следует рассматривать как виды-индикаторы антропогенного эвтрофирования. Практически для всех них определена сапробная валентность и индикаторное значение по системе Кольквитца-Марссо-

на, многократно усовершенствованной различными исследователями [8, 9, 10]. Это позволяет дополнить характеристику степени эвтрофирования поверхностных вод данными сапробиологического анализа.

В результате проведенных вычислений средней сапробности получена оценка эколого-биологического качества вод рек Дона и его притоков, р. Цны и Челновой, Воронежского, Челновского, Котовского, Тамбовского водохранилищ.

Данные, полученные по р. Дон, представлены в виде продольного биологического разреза качества воды (рис. 1). Продольные профили построены также по Богучарскому (реки Богучарка, Левая Богучарка, Дон), Россошанскому (реки Россошь, Черная Калитва, Дон) и Павловскому (реки Гаврило, Дон) участкам детализации и по рекам Челновая и Цна (рис. 2). Конфигурация

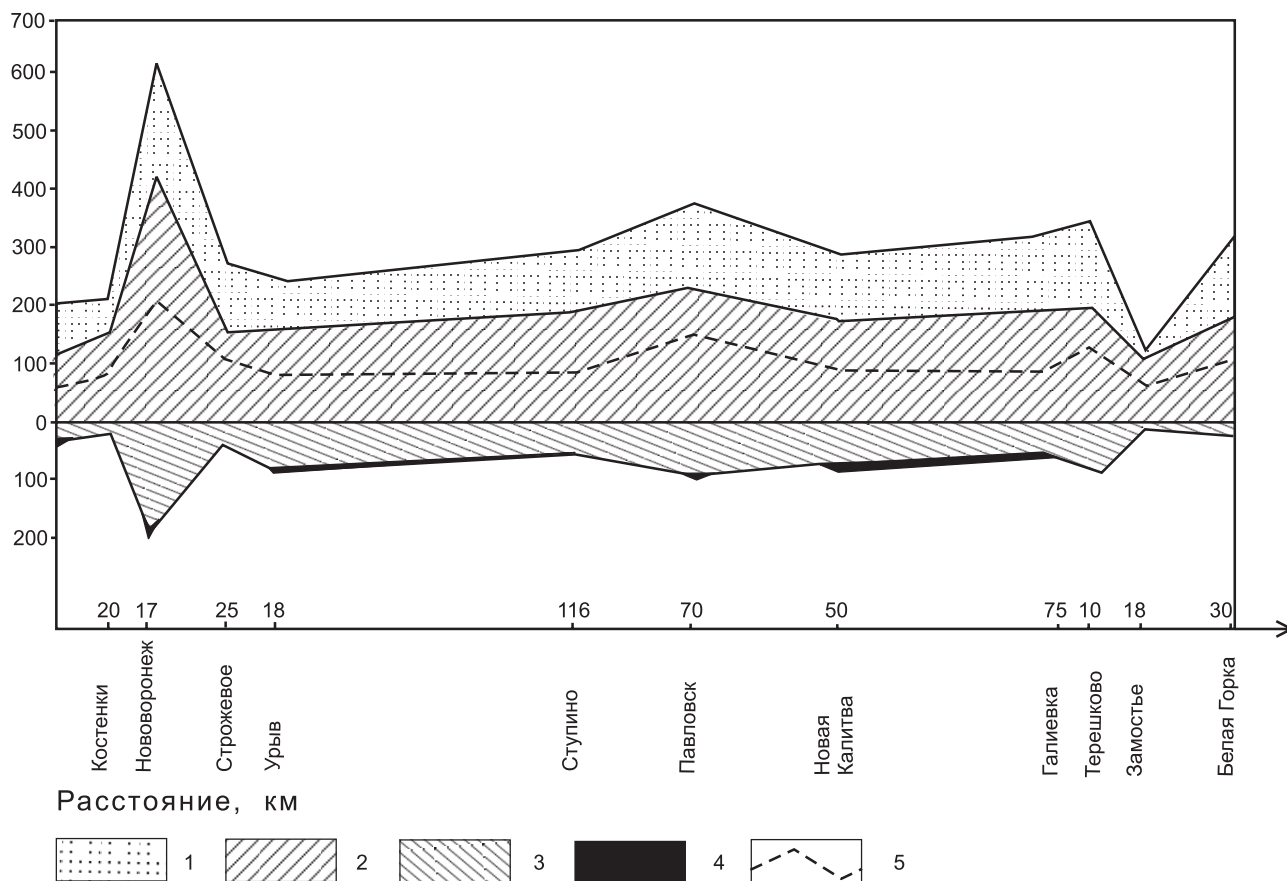


Рис. 1. Биологический разрез качества воды р. Дон в пределах Воронежской области в июле 2003 г.:

1 – олигосапробы, 2 – бета-мезосапробы, 3 – альфа-мезосапробы, 4 – полисапробы, 5 – «линия центра тяжести» – средний балл ступени сапробности

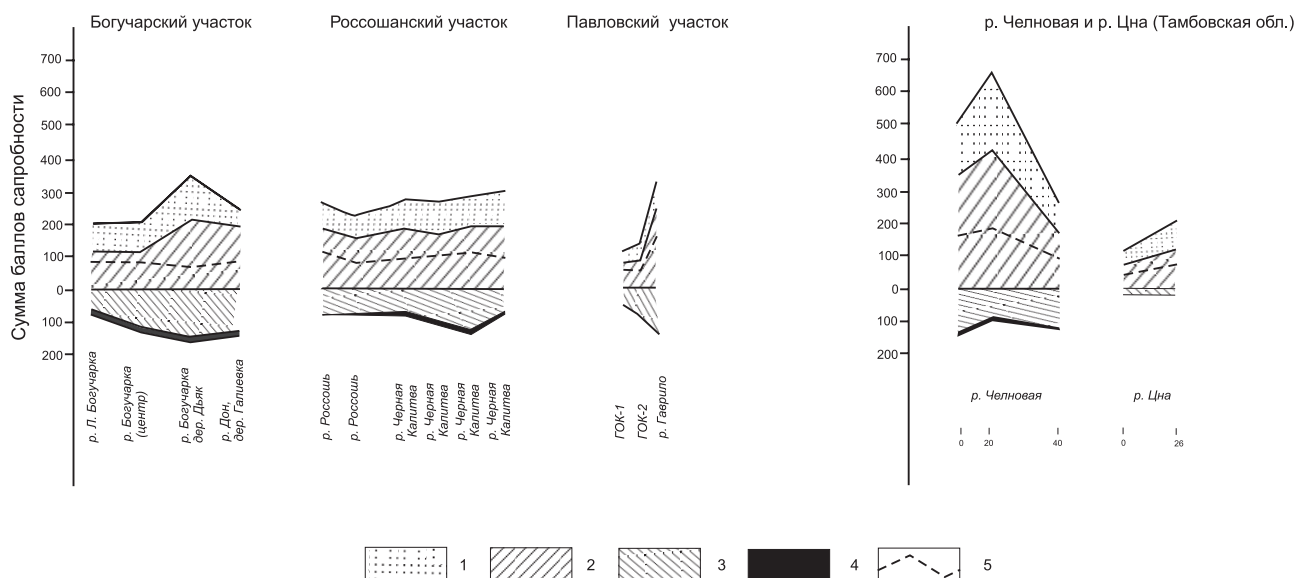


Рис. 2. Биологический разрез качества вод (июль – сентябрь 2003 г.):

1 – олигосапробы, 2 – бета-мезосапробы, 3 – альфа-мезосапробы, 4 – полисапробы, 5 – «линия центра тяжести» – средний балл ступени сапробности

и величины полей различной сапробности показывают соотношение сумм баллов валентной сапробности по видам-индикаторам зон сапробности. При графическом отображении сумма баллов  $\alpha$ -мезосапробов и по-

лисапробов принимается за отрицательную величину и откладывается в нижней части диаграммы. Сумма баллов олигосапробов и  $\beta$ -мезосапробов соответственно принимается за положительную величину [9].



Зона полисапробных вод характеризуется преобладанием редуционных процессов, когда деструкция органики превышает ее первичную продукцию. В этой зоне наблюдается очень низкое содержание кислорода и большие концентрации растворенной углекислоты. Происходит интенсивное разложение органического вещества с образованием в донных осадках сернистого железа и сероводорода. Полисапробные воды в Дону проявляются более интенсивно на отрезке акватории между населенными пунктами Новая Калитва – Галиевка. Это связано с загрязнениями, привнесенными водами рек Черная Калитва (Россошанский участок) и Богучарка (Богучарский участок), для которых они также характерны. В обследованных пунктах на р. Цне полисапробы не наблюдаются, как и в Дону ниже по течению от с. Галиевка.

Зона олигосапробных вод показывает степень интенсивности процессов минерализации органических загрязнений до образования минерального субстрата. В этой зоне преобладает законченное окисление. В умеренных географических широтах центральной России такого типа воды произошли в результате минерализации из загрязненных вод. Они распространены повсеместно и достаточно равномерно.

Мезосапробная зона подразделяется на  $\alpha$ -мезосапробную и  $\beta$ -мезосапробную. В ней происходит уменьшение, по сравнению с полисапробной зоной, интенсивности редукиции и преобладание окислительных процессов.

Воды  $\alpha$ -мезосапробные характеризуются энергичным самоочищением. Они распространены повсеместно и достаточно равномерно. В них широко развиты диатомовые, синезеленые, зеленые водоросли, при фотосинтезе активно выделяющие кислород. В  $\beta$ -мезосапробных водах процессы самоочищения протекают менее активно, чем в  $\alpha$ -мезосапробных. Вследствие окислительных процессов нередко наблюдается перенасыщение кислородом, среди продуктов минерализации преобладают такие как нитриты, нитраты. Здесь также распространены диатомовые, синезеленые, зеленые водоросли. Многие высшие водные растения находят в этих водах оптимальные условия для своего развития.

Тип  $\beta$ -мезосапробных вод является доминирующим. Это подтверждается и расположением на биологических разрезах качества вод линии среднего значения суммы баллов сапробности (см. рис. 1, 2, пунктирная линия). В целом воды региона относятся к  $\beta$ -мезосапробному типу, т.е. доминирующими являются окислительные процессы, нередко наблюдается перенасыщение кислородом. Распространены диатомовые, синезеленые, зеленые водоросли, высшие водные растения.

На Дону на станции наблюдения Замостье график (см. рис. 1) отражает соотношение зон сапробности, где значение сумма баллов  $\alpha$ -мезосапробов и олигосапробов минимально, полисапробы не наблюдаются. Обследованное на данном участке русло Дона меандрирует. Его ширина до 250 м, течение сильное,

прозрачность вод не более 0,5 м. Высота первой надпойменной левобережной террасы около 6 м. Ее поверхность задернована, заболочена, наблюдаются старицы. Правый берег низкий, его обозримое пространство шириной до 0,5–1 км представляет собой тростниково-камышевые заросли. Соответственно преобладает в таких условиях тип  $\beta$ -мезосапробных вод, детально охарактеризованных выше. Интересная картина соотношения зон сапробности восстанавливается на участке Дона у г. Нововоронежа. Выше, при описании процессов эвтрофикации водных экосистем этот участок охарактеризован достаточно детально. Нижний пик  $\alpha$ -мезосапробных вод объясняется чрезвычайно интенсивными процессами самоочищения акватории. Русло Дона, а также его старицы, в которую поступают воды из прудов-охладителей НВ АЭС, выстлано сплошной пленкой, представляющей собой рыхлую буровато-зеленовато-оливкового цвета дерновину толщиной 2–4 мм. Это симбиоз диатомовых и синезеленых водорослей на тонком иловом субстрате. Такая пленка наблюдается у берегов, всплывает при перемешивании толщи воды, например при движении моторных лодок. Она имеет положительное значение для реки, поскольку, по наблюдениям, в зоне проникновения света она вся пронизана пузырьками кислорода. Максимальные значения сумм баллов сапробности олигосапробных и  $\beta$ -мезосапробных видов (верхние пики), характеризующие развитие соответствующих типов вод, связывается, в частности, с термическим загрязнением. Наблюдается постоянно повышенная температура воды в старице и в месте ее впадения в Дон. В июле она составила 28 °С по сравнению с естественным уровнем температуры воды в Дону вне зоны действия старичных вод 21,5–22 °С. По данным контроля радиационной обстановки аномалий не фиксируется.

На профиле биологического качества вод р. Челновой наблюдается соотношение суммы баллов валентной сапробности видов и качество вод схожее с биологическим качеством вод р. Дон в районе Нововоронежской АЭС. Максимум показан по пробам фитопланктона и микрофитобентоса, отобранным на р. Челновой у д. Дегтянка Сосновского района Тамбовской области из вод, подвергающихся техногенной нагрузке (небольшой карьер строительных материалов, строительство автомобильного моста, выбросы расположенного рядом промышленного предприятия). В месте отбора пробы (широкая мелководная заводь, заросшая камышом озерным, манником, роголистником, нитчатками водорослями, ряской и др.) была отмечена повышенная температура воды, 28–30 °С на фоне 19,5–21 °С в русле реки. Территория расположена на участке, имеющем радиационное загрязнение вследствие аварии на Чернобыльской АЭС.

В системе Общегосударственной службы наблюдения и контроля состояния природной среды применяется оценка качества вод шестью классами: от 1 (очень чистые) до 6 (очень грязные). Каждый класс вод характеризуется совокупностью формализованных гидробиологических показателей, одним из них

является метод вычисления индекса сапробности по Пантле и Букку в модификации Сладечека [11]. Этот метод позволяет представлять состояние вод числовыми значениями, что обеспечивает возможность сопоставления результатов биологического анализа вод, изученных в различных районах и в разные сроки опробования. Проведенные исследования показали, что качество поверхностных вод бассейна Верхнего Дона относится к классу 3 – умеренно загрязненные, в пределах индекса сапробности 1,51–2,50. Определенные индексы сапробности р. Дон и его притоков, Цны и Челновой располагаются в пределах от 1,46 до 2,15. В пределах класса 3 располагаются показатели индексов сапробности крупных водохранилищ Воронежской и Тамбовской областей. При «цветении» вод, а также на локально загрязненных участках класс их вод может быть определен как 4 – загрязненные.

Объединение всех полученных показателей эколого-биологического качества вод позволяет восстановить общую картину состояния водных экосистем региона и определить степень их кризисности по способности к самоочищению (табл. 6).

Водные объекты бассейна Верхнего Дона заведомо испытывают постоянную направленную антропогенную нагрузку различного, в том числе и токсического, характера. В этих условиях сформировалась определенная структура природно-антропогенных сообществ низших водорослей, основные элементы которой выражены во всех водоемах и водотоках:

- Низкое видовое разнообразие;
- Сходство видового состава сообществ по различным водоемам;

- Доминирование 1–2 видов, создающих высокие показатели биомассы и численности, при единичном развитии других.

На основе этих признаков установлено, что водные экосистемы Воронежской и Тамбовской областей по степени кризисности эколого-биологического состояния находятся в стадии обратимых изменений.

В условиях чрезвычайно высоких загрязнений, возникающих, например на локальных участках акваторий водохранилищ, вследствие особых гидродинамических условий, ограниченности их размеров, высоких промышленных и коммунальных нагрузок, проявляются следующие признаки:

- Снижение видового разнообразия диатомовых водорослей до 1–2 видов и даже до полного их исчезновения;
- «Цветение» вод синезелеными водорослями, представленными 1–2 видами, характерными для загрязненных водоемов.

Признаки подобного эколого-биологического состояния водных объектов свидетельствуют о пороговой стадии кризисности водной экосистемы, т.е. свидетельствует о том, что дальнейшее увеличение антропогенного загрязнения может вызвать необратимые изменения.

Общая тенденция антропогенного загрязнения направлена на дальнейшее увеличение степени эвтрофирования. По эколого-биологическому качеству эвтрофных вод в целом они определяются как «умеренно загрязненные». Более загрязненными представляются локальные участки акваторий, имеющие высокие промышленные и коммунальные нагрузки. В подобном случае качество

Таблица 6

**Общие показатели состояния водных объектов Воронежской и Тамбовской областей по данным эколого-биологического анализа сообществ фитопланктона**

Показатели		Оценки показателей и пределы изменения их значений
Индекс сапробности по Пантле-Букку в модификации Сладечека		1,51–2,50
Класс качества вод по гидробиологическим показателям (фитопланктону и микрофитобентосу)		3
Степень загрязненности водотоков и водоемов по Воронежской и Тамбовской областям		Умеренно загрязненные
Биомасса фитопланктона, мг/л		5,1–10,0
Индекс сапробности по Пантле-Букку в модификации Сладечека		2,51–3,50
Класс качества вод по гидробиологическим показателям (фитопланктону и микрофитобентосу)		4
Степень загрязненности крупных водохранилищ при «цветении» вод синезелеными водорослями		Загрязненные
Биомасса фитопланктона, мг/л		более 10,0
Прозрачность вод по диску Секки	Проточные	0,35–1,5 м, до 4 м
	Непроточные	0,5–1,5 м, до 6 м
Степень кризисности водных экосистем Воронежской и Тамбовской областей по состоянию процессов самоочищения		Стадия обратимых изменений

их вод определяется 4-м классом, т.е. как «загрязненные» (см. табл. 5). По способности к самоочищению поверхностные воды региона находятся на стадии обратимых изменений. Это определяет достаточно высокий уровень процессов переработки, окисления и минерализации органического вещества. При значении показателей индекса сапробности в интервале от 1,51 до 2,50 и нахождении процессов самоочищения преимущественно в  $\beta$ -мезосапробной зоне сообщество может двигаться как в сторону увеличения сапробности и снижения видового разнообразия, так и в противоположную. Последнее направление можно считать восстановлением природного состояния в процессе самоочищения водной среды. Оно возможно при снятии антропогенного трофического пресса, т.е. при понижении сложившегося в настоящее время уровня поступающих биогенных, органических и токсических веществ, растворенных в воде. При увеличении значений индекса сапробности до 2,51–3,50 на отдельных участках акваторий видовое разнообразие снижается настолько, что сообщество еще может вернуться к  $\beta$ -мезосапробному состоянию процессов самоочищения, но для этого не достаточно только снятия трофической нагрузки. В этом случае водный объект требует применения комплекса мер по снижению антропогенной нагрузки, что подразумевает необходимость вмешательства человека.

Существование эвтрофной экосистемы с самостоятельно протекающими процессами самоочищения на уровне умеренно загрязненного класса качества вод зависит от объема поступления аллохтонного органического вещества небиологического происхождения и токсикантов. Экологический прогноз – положительный. При отсутствии выполнения природоохранных мероприятий экологический прогноз – отрицательный. В таком случае возможен переход к классу качества вод «грязные» и «очень грязные», в которых процессы самоочищения водоема подавлены. Это пороговая стадия, при переходе через которую следует стадия необратимых изменений. Продолжительность подобного процесса может составить годы (см. табл. 4).

Таким образом, сопоставление процессов эвтрофирования межледниковых и современных водоемов показывает, что они имеют общую природную основу. Однако в межледниковых водоемах длительность эвтрофикации определялась веками и тысячелетиями, поскольку самоочищение в природных водных экосистемах сбалансировано. Оно обеспечивалось не только различными биохимическими процессами, но также гидробионтами, имеющими высокие видовые и количественные показатели. В конечном итоге водоемы прекращали свое существование или вследствие заполнения своих котловин органическими и терригенными осадками или в связи с наступлением неблагоприятных

природных условий, например похолодание климата в раннеледниковое время. Сообщества фитопланктона и микрофитобентоса, являясь непосредственными участниками этого процесса, выступают как биологические индикаторы, позволяющие восстанавливать эволюцию водных экосистем. Данные свойства низших водорослей, диатомовых и синезеленых, позволяют проводить оценку современных водных экосистем. Анализ процессов их эвтрофикации, эколого-биологического качества вод дает основание рассматривать их как природно-антропогенные экосистемы. Возможность оценить продолжительность происходящих под воздействием антропогенных (техногенных) нагрузок негативных перемен позволяет сделать вывод об общественной значимости проблемы состояния поверхностных вод. Это должно выражаться не только в соблюдении природоохранных мероприятий, всемерном экологическом образовании населения, но также в усовершенствовании методик изучения эколого-биологического состояния вод.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдова, Н.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы экологических условий водоемов в голоцене / Н.Н. Давыдова. – Л., 1985. – 244 с.
2. Дракцова, В.Г. Эволюция озер под влиянием развития их экосистем / В.Г. Дракцова // Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения истории озер. – Л., 1986. – С. 27–33.
3. Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения истории озер. – Л., 1986. – 254 с.
4. Петрова, Н.А. Сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофировании больших озер / Н.А. Петрова. – Л., 1990. – 200 с.
5. Россолимо, Л.Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора / Л.Л. Россолимо. – М., 1977. – 144 с.
6. Анциферова, Г.А. Эволюция диатомовой флоры и межледникового озерного осадконакопления центра Восточно-Европейской равнины в неоплейстоцене / Г.А. Анциферова // Тр. НИИ Геологии ВГУ. – Воронеж, 2001. – Вып. 2. – 198 с.
7. Холмовой, Г.В. Об условиях карбонатного кремнеаккумуляции в озерах мучкапского межледниковья / Г.В. Холмовой, Г.А. Анциферова, Б.В. Глушков // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – Воронеж, 2003. – № 1. – С. 13–21.
8. Экологический мониторинг. Методы биомониторинга. – Н. Новгород, 1995. – Ч. 1. – 190 с.
9. Макрушин А.В. Биологический анализ качества вод / А.В. Макрушин. – Л., 1974. – 60 с.
10. Унифицированные методы исследования качества вод. Методы биологического анализа вод. Индикаторы сапробности. – М.: Изд-во СЭВ, 1975. – С. 21–31.
11. Методика изучения биоценозов внутренних водоемов. – М., 1975. – С. 73–117.