

- dlja tehnologicheskikh celej i akvakul'tury. – Krasnojarsk: Izd-vo SFU, 2011. – 185 s.
2. *Morozova O.G., Kamoza T.L., Kojupchenko I.N.* [i dr.]. Problemy jekspluatacii vodoema-ohladiatelja na primere Berezovskoj GRJeS-1 // *Теплоэнергетика*. – 2017. – № 8. – S. 81–88.
  3. *Kartashova T.M., Shtarkman B.P.* Obobshhennyj kriterij optimizacii – funkcija zhelatel'nosti // *Informacionnye materialy Nauchnogo soveta po kompleksnoj probleme «Kibernetika» AN SSSR*. – 1970. – № 8 (45). – S. 55–60.
  4. *Morozova O.G., Pen R.Z.* Svidetel'stvo o registracii bazy dannyh № 2012620586 (data reg. 19.06.2012). Pokazateli kachestva vody vodoema-ohladiatelja Berezovskoj GRJeS-1 za period 1987–1996 g. – Krasnojarsk, 2012.
  5. *Dubrov A.M., Mhitarjan V.S., Troshin L.I.* Mnogomernye statisticheskie metody. – M.: *Finansy i statistika*, 2003. – 352 s.
  6. *Ajvazjan S.A., Buhstaber V.M., Enjukov I.S.* [i dr.]. *Prikladnaja statistika: klassifikacija i snizhenie razmernosti*. – M.: *Finansy i statistika*, 1989. – 607 s.
  7. *Statgraphics Centurion XV. User Manual*. – URL: [www.statgraphics.com](http://www.statgraphics.com). – USA, 2005. – 295 p.



УДК 556.621.311.21

*А.С. Савельев, С.А. Супрун,  
О.Г. Морозова, Р.З. Пен*

### ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ВОДЫ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БГРЭС-1 ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

*A.S. Savelyev, S.A. Suprun,  
O.G. Morozova, R.Z. Pen*

### THE PRINCIPLES OF OPTIMISATION OF THE RESERVOIR-COOLER OF BGRES-1 WATER QUALITY FOR TECHNOLOGY PURPOSES

**Савельев А.С.** – канд. техн. наук, доц. каф. геоинформационных систем Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: [ogmorozova45@mail.ru](mailto:ogmorozova45@mail.ru)

**Супрун С.А.** – директор МП МУК «Красноярская», г. Красноярск. E-mail: [ogmorozova45@mail.ru](mailto:ogmorozova45@mail.ru)

**Морозова О.Г.** – д-р биол. наук, проф. каф. валеологии Торгово-экономического института Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: [ogmorozova45@mail.ru](mailto:ogmorozova45@mail.ru)

**Пен Р.З.** – д-р техн. наук, проф. каф. машин и аппаратов промышленной технологии Института химических технологий Сибирского университета науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск. E-mail: [ogmorozova45@mail.ru](mailto:ogmorozova45@mail.ru)

**Savelyev A.S.** – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Geographic Information Systems, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: [ogmorozova45@mail.ru](mailto:ogmorozova45@mail.ru)

**Suprun S.A.** – Director, MUE 'Krasnoyarskaya', Krasnoyarsk. E-mail: [ogmorozova45@mail.ru](mailto:ogmorozova45@mail.ru)

**Morozova O.G.** – Dr. Biol. Sci., Prof., Chair of Valueology, Trade and Economic Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: [ogmorozova45@mail.ru](mailto:ogmorozova45@mail.ru)

**Pen R.Z.** – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Cars and Devices of Industrial Technology, Institute of Chemical Technologies, Siberian University of Science and Technologies named after Acad. M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk. E-mail: [ogmorozova45@mail.ru](mailto:ogmorozova45@mail.ru)

*Обеспеченность водными ресурсами территории является решающим фактором при строительстве и эксплуатации производ-*

*ственных мощностей, в том числе крупнейших потребителей воды – предприятий энергетики, а именно теплоэлектростанций. Воздей-*

ствие на природные водные объекты, эксплуатируемые комплексом теплоэлектростанции, по объемам и разнообразию является в глобальном масштабе значительным. Для преодоления последствий «освоения» природных экосистем необходим научно обоснованный анализ факторов формирования качества воды, оценка самоочищающей способности экосистемы вновь сооруженных водоёмов-охладителей. Мониторинг и статистическая обработка результатов с количественной оценкой изменения природных параметров качества воды за значительный временной интервал дают возможность прогнозирования качества воды водоёмов-охладителей, что необходимо для обеспечения экономически эффективного производства энергии. Еще на стадии проектирования водоема-охладителя БГРЭС-1 были допущены просчеты, которые способствовали возникновению ситуации экологического риска для экосистемы водного объекта. Преимущественное ветровое направление, естественное течение и циркуляционный поток охлаждающей воды приводят к скоплению в районе правобережья, где находится водозабор ГРЭС, загрязнений, поступающих с реками, что послужило причиной эвтрофирования водоёма. При существующих способах подготовки ложа водохранилищ возникают серьёзные проблемы в водотоках нижнего бьефа; происходит эвтрофирование, ухудшение санитарно-бактериологической обстановки. Отопление воды в водоёмах-охладителях приводит к ухудшению характеристик качества воды.

**Ключевые слова:** водоем-охладитель, качество воды, гидрохимические, гидробиологические показатели.

*The security of the territory with water resources is decisive factor at construction and operation of capacities, including the largest consumers of water, i.e. the enterprises of power, namely thermal power plants. The impact on natural water objects operated by the complex of thermal power plant on the volumes and variety on global scale is considerable. Evidence-based analysis of factors of formation of water quality, the assessment of self-clearing ability of the ecosystem of newly built reservoirs-coolers is necessary to overcome the con-*

*sequences of natural ecosystems "development". Monitoring and statistical processing of the results with quantitative assessment of change of natural parameters of water quality for considerable time interval gives the chance of forecasting water quality of reservoirs-coolers necessary for ensuring economically effective energy production. At design stage of the reservoir-cooler of BGRES-1 miscalculations which promoted the emergence of the situation of environmental risk for the ecosystem of water object were allowed. Primary wind direction, natural current and circulating stream of cooling water lead to the congestion around right bank having water intake of state district power station, the pollution arriving with the rivers served the reason of reservoir's eutrophication. At existing ways of preparation of reservoirs bed there are serious problems in the waterways of lower upstream; there is eutrophication, deterioration of sanitary and bacteriological situation. Water heating in the reservoirs-coolers leads to the deterioration of water quality characteristics.*

**Keywords:** reservoir cooler, water quality, hydrochemical, hydrobiological indicators.

**Введение.** Водоём-охладитель БГРЭС-1 создан зарегулированием стока р. Береш в районе впадения в неё рек Базыр и Кадат; верхняя часть бассейна р. Береш расположена в юго-восточной части Кузнецкого Алатау, средняя и нижняя части – на территории Енисейско-Чулымской котловины. Характер регулирования стока – сезонный, уровень воды в водохранилище регулируется сбросом в нижний бьеф через р. Береш [1].

Заполнение водоёма началось в августе 1986 г. При проектировании водоема-охладителя БГРЭС-1 были недостаточно проанализированы данные по гидрометеорологическим параметрам района строительства, в том числе не учтены гидрогеологический характер местности и направление господствующих ветров; не проведена инвентаризация источников загрязнения рек, неверно интерпретированы данные температурного режима водотоков, формирующих будущий водоем-охладитель. В верховьях водоема-охладителя на территории пойм рек было запроектировано размещение картрионного потока которых проходила в реки и

водохранилище. Преимущественное направление ветров на водоеме и естественное течение рек приводили к механическому скоплению и блокированию водозабора ГРЭС загрязняющими объектами, появляющимися на водоеме в период его наполнения и формирования качества воды. В районе верхнего бьефа водоема в р. Кадат поступают стоки коммунальных очистных сооружений г. Шарыпово.

Таким образом, при выполнении проекта строительства БГРЭС-1 были допущены просчеты, которые способствовали возникновению ситуации экологического риска для экосистемы водного объекта. Отепление воды в водоёме-охладителе и вышеперечисленные факторы послужили причиной эвтрофирования водоёма, ухудшения санитарно-бактериологических, гидрохимических характеристик качества воды.

**Цель исследования.** Разработка и реализация программы мониторинга качества воды водоема-охладителя БГРЭС-1 путем отбора проб и определения качества воды стандартными методиками аналитического контроля.

При этом учитывались специфические особенности природно-техногенной системы водоема-охладителя БГРЭС-1. Результаты натурных исследований использовались для разработки и выполнения научно обоснованных рекомендаций по рациональному природопользованию. Результаты мониторинга качества воды также

важны для составления рекомендаций по обеспечению экологической безопасности территории, прилегающей к природно-техногенному комплексу. Интерпретация результатов дает возможность выявить факторы формирования качества воды, что входит в задачи исследования. Обработка данных мониторинга методами математической статистики явилась научной основой для прогноза качества воды в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

**Объекты и методы исследования.** Натурные наблюдения на водоеме-охладителе проводили в течение десяти лет, начиная с 1987 г. Пробы воды отбирали в характерных по специфике влияния различных факторов на качество воды восьми точках акватории водоема (рис. 1), с интервалом два месяца. Контроль качества воды проводился по 18 показателям. Первичные результаты мониторинга представляют собой массивы численной информации [2]. Для структурирования и анализа массива данных был сформирован специальный программный комплекс, включающий ряд методов прикладной статистики [3]. При обсуждении результатов учитывались такие факторы, как специализация водоема, его морфология, гидрологические параметры, характер водосбора, т.е. те факторы, которые определяли физические, химические и биологические свойства водного объекта.



Рис. 1. Карта-схема водоема-охладителя БГРЭС-1

Распределение свойств по акватории водоема представляли графически в виде изолиний, для чего использовали элементы геоинформационного моделирования (ГИС-технологии). Для выявления скрытых периодичностей использовали периодограммы (методы спектрального Фурье-анализа) и автокорреляционные функции (методы авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего). Одновременно получали линии трендов – нециклических компонентов временного ряда, которые показывают влияние долгосрочных факторов, эффект которых проявляется постепенно. Для выявления связей

между наблюдаемыми показателями качества воды вычисляли матрицы парных линейных корреляций и кросс-корреляций [4]. Структуру матриц изучали с помощью факторного анализа (методы итеративных общностей и ортогонального преобразования пространства факторов).

**Результаты и их обсуждение.** Водоёмы-охладители имеют специфический термический режим, обусловленный тепловым сбросом воды, охлаждающей конденсаторы; влияние теплового сброса на термический режим водоёма проявляется на акватории водоёма, о чем свидетельствует линия тренда на рисунке 2.

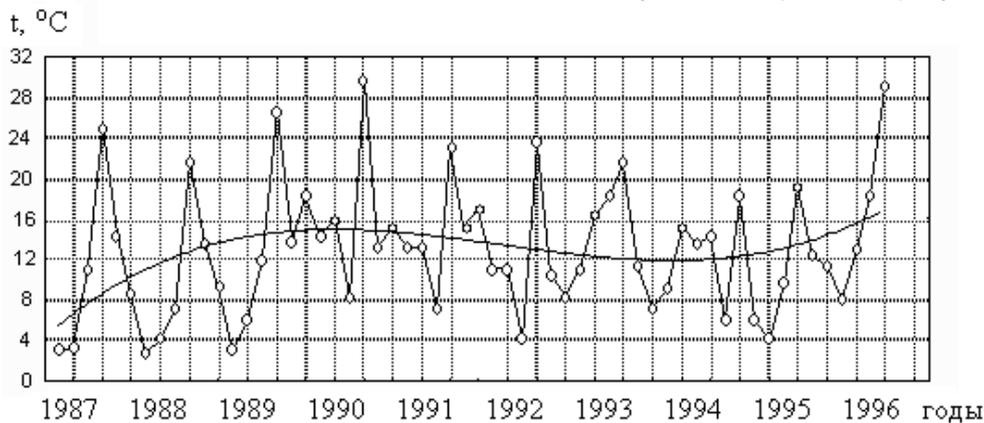


Рис. 2. Сезонные колебания и многолетний тренд температуры в устье сбросного канала БГРЭС-1 (точка 4)

Увеличение температурной нагрузки на водоём отрицательно повлияло на кислородный режим, что способствовало интенсификации процессов эвтрофирования [1]. Отепление акватории сбросного канала приводит к преоблада-

нию деструкционных процессов над продукционными, о чем свидетельствует сравнение трендов содержания кислорода в районе сбросного канала и центральной части водоема.

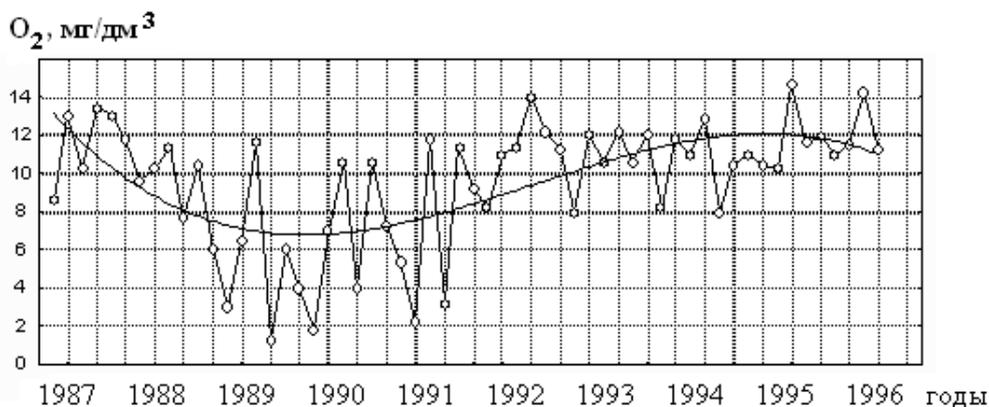


Рис. 3. Сезонные колебания и многолетний тренд концентрации растворенного кислорода (мг/дм³) в приплотинной части (точка 8)

Кислородный режим в приплотинной части водоема определялся, с одной стороны, поступлением кислорода в результате фотосинтетической деятельности фитопланктона, а с дру-

гой – значительным расходом кислорода на разложение органического вещества, аккумулирующегося в этой части акватории (рис. 3).

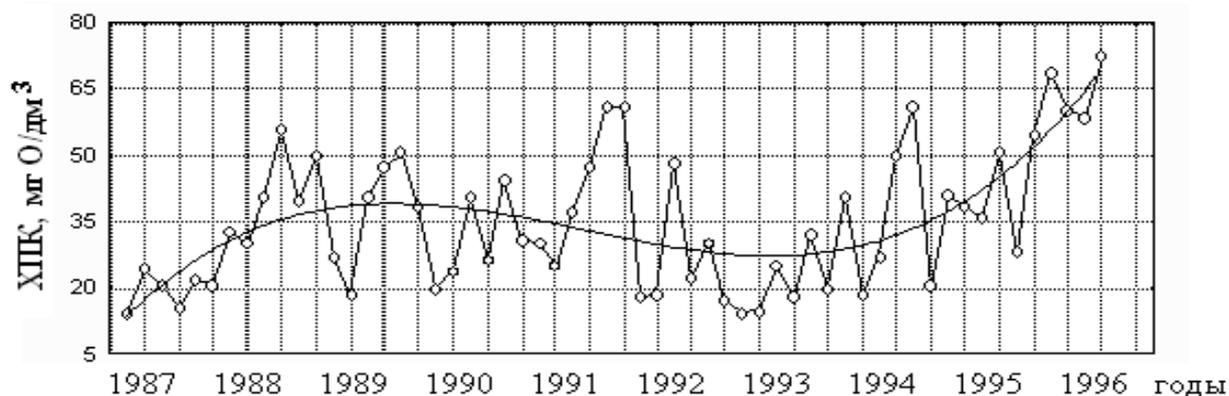


Рис. 4. Сезонные колебания и многолетний тренд показателя ХПК в районе основного торфяника (точка 5)

Формирование режима органических и биогенных веществ происходило под влиянием многочисленных факторов, как общих для всех водоёмов, так и специфичных для данного водоёма. Период первого повышения показателя ХПК связан с массовым поступлением гумусовых веществ из всплывших торфяников и тепловым сбросом первого энергоблока; период второго повышения показателя ХПК связан с влиянием теплового сброса работающих двух энергоблоков ГРЭС. Линия многолетнего тренда показателя ХПК (рис. 4) в период 1995–1996 гг. в точке 5 проходит круче, чем в других частях

акватории водоема, что связано с увеличением объема торфа, транспортируемого за дамбу с остальной части акватории водоема.

Начиная с 1990 г. во внутригодовой динамике распределения фосфатов по водоему обнаруживалось закономерное уменьшение концентрации фосфатов с начала вегетационного периода. Вероятно, это произошло в связи с резким увеличением первичного продуцирования органического вещества фитопланктона и высшей водной растительности в этот временной период в результате аккумуляции фосфатов и отеплением водоема.

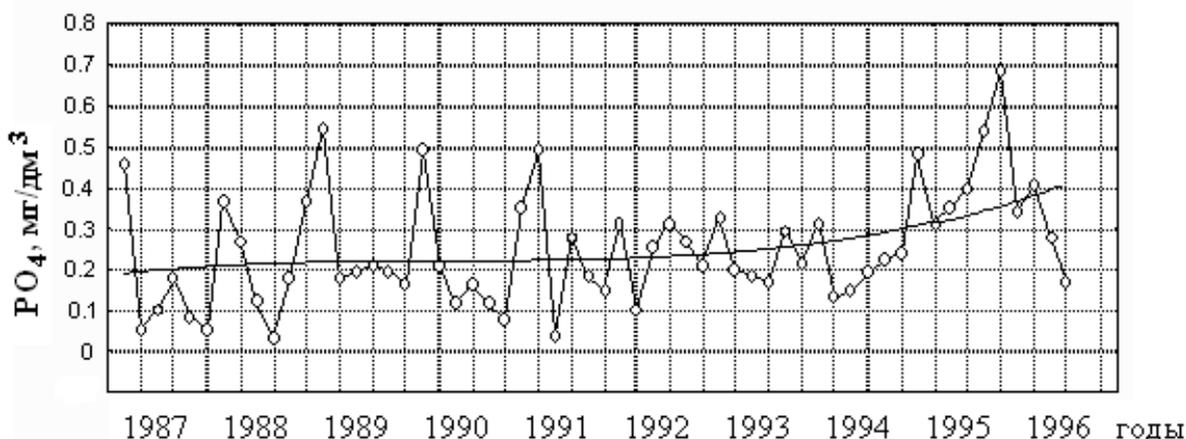


Рис. 5. Сезонные колебания и многолетний тренд концентрации фосфатов в устье реки Кадат (точка 3)

Сезонная периодичность в характере колебаний содержания фосфатов не обнаружена; очевидно, годовая периодичность связана со сроками внесения фосфорных удобрений на поля и поступлением их с дождевыми водами в реки, а затем в водоем. Можно сделать вывод, что круглогодичные процессы поступления соединений фосфора с речным стоком и из затопленного торфа нивелируют сезонные закономерности их колебаний, отмеченные в водоемах, не испытывающих значительных антропогенных поступлений. Поступление органических, биогенных веществ с реками в небольшой по объему малопроточный водоем привело к эвтрофикации его уже в первоначальный период заполнения [1].

В результате проведенных исследований были разработаны и внедрены рекомендации по снижению темпов эвтрофирования и улуч-

шения качества воды на участках акватории водоема-охладителя БГРЭС-1, испытывающих пиковые антропогенные нагрузки. Проведение водомелиоративных работ – удаление участков заиления в районе устья сбросного канала, углубление прибрежной акватории – значительно изменило экологическую ситуацию в этих частях акватории водоема.

Для выявления связей между наблюдаемыми показателями качества воды вычисляли матрицы парных линейных корреляций и кросс-корреляций [4]. Структуру матриц изучали с помощью факторного анализа (методы итеративных общностей и ортогонального преобразования пространства факторов). Было установлено, что значительная доля (более 30%) суммарной дисперсии всех изученных свойств обусловлена влиянием двух латентных факторов (рис. 6).

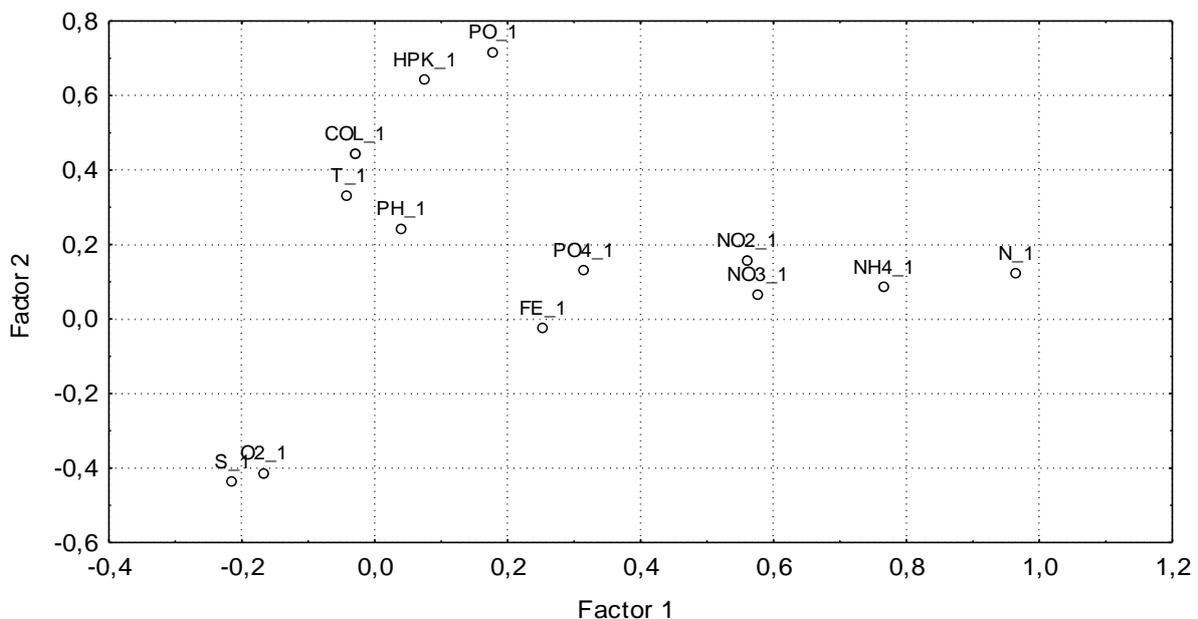


Рис. 6. Расположение контролируемых показателей качества воды в двухфакторном пространстве без учета кросс-корреляций

Проведение факторного анализа с учетом кросс-корреляций показало, что два фактора ответственны за 36,4 % суммарной дисперсии 13 наблюдаемых параметров.

Природа первого фактора может быть названа с высокой степенью вероятности. Очевидна его связь с концентрациями биогенных соединений; колебания величины фактора полностью лишены сезонной периодичности.

Наибольшая среднегодовая величина фактора приходится на акваторию устья р. Кадат, поэтому первый фактор, влияющий на показатели качества воды водоема-охладителя, связан с поступлением биогенных соединений со стоком р. Кадат.

Колебания величины второго фактора имеют отчетливый циклический характер с лагом корреляционной функции, соответствующим пе-

риоду в один год. Наибольшие среднегодовые значения второго фактора приходятся на акваторию, занятую мощными торфяными залежами в ложе водоема-охладителя; органические вещества затопленного торфа явились причиной появления в воде высокого значения показателя ХПК.

Загрязненный сток р. Кадат и процессы деградации затопленных торфяных залежей под действием теплового сброса электростанции и гидрометеорологических условий привели к поступлению в воду водоема-охладителя растворенных органических веществ до 85,0 мг/дм<sup>3</sup> (по ХПК); биогенных соединений: до 2,5 мг/дм<sup>3</sup> нитритов; 4,2 мг/дм<sup>3</sup> нитратов; 4,7 мг/дм<sup>3</sup> аммонийного азота; 0,7 мг/дм<sup>3</sup> фосфатов.

**Выводы.** Таким образом, мониторинг водной экосистемы водоема-охладителя БГРЭС-1 и обработка результатов методами математической статистики позволили сделать заключение об экологическом состоянии водоема-охладителя БГРЭС-1 на современном временном отрезке. Высокий уровень антропогенного загрязнения обусловил развитие процессов эвтрофирования экосистемы водоема-охладителя.

Выявлены основные факторы эвтрофикации водоема-охладителя в ходе многолетнего мониторинга и обработки массива данных методами математической статистики. Первый фактор, влияющий на показатели качества воды водоема-охладителя, связан с поступлением органических и биогенных соединений со стоком реки Кадат. Второй фактор можно отождествить с геофизическими условиями, в том числе – гидрометеорологическими, от которых зависит температурный режим водоема-охладителя БГРЭС-1. Температура воды водоема является составляющей второго фактора, помимо естественных сезонных колебаний, она подвержена влиянию теплового сброса теплоэлектростанции. Температура влияет на процессы разложения органического вещества, а в первую очередь это – содержание органического вещества, характеризующееся показателями ПО и ХПК (пер-

манганатная окисляемость и химическое потребление кислорода) затопленного торфа.

### Литература

1. Морозова О.Г., Пен Р.З., Фоменко Ю.П. Принципы оптимизации качества воды водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 для технологических целей и аквакультуры. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2011. – 185 с.
2. Морозова О.Г., Пен Р.З. Свидетельство о регистрации базы данных № 2012620586 (дата рег. 19.06.2012). Показатели качества воды водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 за период 1987–1996 гг. – Красноярск, 2012.
3. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 352 с.
4. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С. [и др.]. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.

### Literatura

1. Morozova O.G., Pen R.Z., Fomenko Ju.P. Principy optimizacii kachestva vody vodoema-ohladiatelja Berezovskoj GRJeS-1 dlja tehnologicheskikh celej i akvakul'tury. – Krasnojarsk: Izd-vo SFU, 2011. – 185 s.
2. Morozova O.G., Pen.R.Z. Svidetel'stvo o registracii bazy dannyh № 2012620586 (data reg. 19.06.2012). Pokazateli kachestva vody vodoema-ohladiatelja Berezovskoj GRJeS-1 za period 1987–1996 gg. – Krasnojarsk, 2012.
3. Dubrov A.M., Mhitarjan V.S., Troshin L.I. Mnogomernye statisticheskie metody. – M.: Finansy i statistika, 2003. – 352 s.
4. Ajvazjan S.A., Buhshaber V.M., Enjukov I.S. [i dr.]. Prikladnaja statistika: klassifikacija i snizhenie razmernosti. – M.: Finansy i statistika, 1989. – 607 s.