

УДК 556. 621.311.21

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

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВЯЗИ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ВОДЫ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БГРЭС-1**

A.S. Saveliev, S.A. Suprun,
O.G. Morozova, R.Z. Pen, M.A. Yanova

**MATHEMATICAL MODEL OF CONNECTION OF HYDROCHEMICAL INDICES
OF WATER QUALITY OF BGRES-1 WATER-COOLER**

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

Супрун С.А. – директор МП МУК «Красноярская», г. Красноярск. E-mail: 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

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

Янова М.А. – канд. с.-х. наук, доц. каф. товарооборота и управления качеством продукции АПК Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: yanova.m@mail.ru

Saveliev 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

Suprun S.A. – Director, MMC “Krasnoyarskaya”, Krasnoyarsk. E-mail: ogmorozova45@mail.ru

Morozova O.G. – Dr. Biol. Sci., Prof., Chair of Val-eology, Trade and Economic Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: 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

Yanova M.A. – Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Chair of Merchandizing and Product Quality Control of Agrarian and Industrial Complex, Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk. E-mail: yanova.m@mail.ru

Основой научного подхода к управлению качеством воды водного объекта является математический анализ зависимости процессов изменения качества воды, поступающей на выход из водоема, от качества воды на входе в водоем-охладитель. Характерная особенность процессов формирования качества воды в водоеме-охладителе БГРЭС-1 – их зависимость от большого числа управляемых и неуправляемых факторов (температура, время, морфология водоема, гидрометеорологические условия, содержание ингредиентов в речном стоке и т. п.), многие из которых изменяются стохастически. Представлены результаты математического моделирования связей между параметрами качества воды стока

и поступления аллохтонных, автохтонных биогенных веществ при антропогенных нагрузках на экосистему водоема-охладителя. Произведена количественная оценка вклада в изменение параметров качества воды притока питающих рек, теплового сброса электростанции, поступлений органических и биогенных веществ в воду из затопленных почв, торфа в процессе формирования качества воды водоема-охладителя за длительный период времени, что создает научную базу для прогноза экологического состояния водоемов-охладителей атомных и тепловых электростанций. Основой научного подхода к управлению качеством воды водного объекта является математический анализ зависимости каче-

ства воды в стоке из водоема от верхней части. В результате исследований были сделаны следующие выводы: 1) между свойствами воды в характерных областях акватории водоема-охладителя тепловой электростанции, с одной стороны, и в приплотинной области стока, с другой стороны, существуют аддитивные причинно-следственные зависимости, поддающиеся математическому моделированию методами регрессионного анализа; 2) математическое моделирование может служить методологической основой оптимизации качества воды водоемов-охладителей ТЭС для технологических целей и аквакультуры.

Ключевые слова: теплоэлектростанция, водоем-охладитель, качество воды, гидрохимические показатели качества воды, математическое моделирование связей.

The basis of scientific approach to quality management of water object is mathematical analysis of dependence of the processes of change of water quality arriving on the exit from the reservoir from the quality of water on the entrance to the reservoir cooler. The characteristic of the processes of formation of water quality in BGRES-1 reservoir cooler is their dependence on a large number of operated and uncontrollable factors (temperature, time, reservoir morphology, hydroweather conditions, the content of ingredients in a river drain, etc.) many of which change stochastically. The results of mathematical modeling of relationship between the parameters of water quality of the drain and the receipt of allochthonous, autochthonous biogenous substances under anthropogenous loads of reservoir cooler ecosystem are presented. Quantitative assessment of the contribution to the change of parameters of water quality of inflow of feeding rivers, thermal dumping of power plant, receipts of organic and biogenous substances in water from flooded soils, peat in the course of formation of quality of water of reservoir cooler for long period of time creating scientific base for the forecast of ecological condition of reservoirs coolers of nuclear and thermal power plants is made. The basis of scientific approach to quality management of water object is mathematical analysis of dependence of quality of water in the drain from the reservoir from the top part. As a result of researches the following conclusions were drawn: 1) between the properties

of water in characteristic areas of water area of reservoir cooler of thermal power plant, on one hand, and in dam area of a drain, on the other hand, there are additive cause and effect dependences being solved by mathematical modeling by methods of regression analysis; 2) mathematical modeling can form methodological basis to optimization of water quality of reservoirs coolers of thermal power plant for the technological purposes and an aquaculture.

Keywords: thermal power plant, reservoir cooler, quality of water, hydrochemical indicators of water quality, mathematical modeling of relationships.

Введение. Основой научного подхода к управлению качеством воды водного объекта является математический анализ зависимости процессов изменения качества воды, поступающей на выход из водоема, от качества воды на входе в водоем-охладитель. Характерная особенность процессов формирования качества воды в водоеме-охладителе БГРЭС-1 – их зависимость от большого числа управляемых и неуправляемых факторов (температура, время, морфология водоема, гидрометеорологические условия, содержание ингредиентов в речном стоке и т. п.) [1], многие из которых изменяются стохастически. Проведено математическое моделирование связей между параметрами качества воды стока и поступления аллохтонных, автохтонных биогенных веществ при антропогенных нагрузках и проанализировано их влияние на экосистему водоема-охладителя. Произведена количественная оценка вклада в изменение параметров качества воды притока рек, теплового сброса электростанции, поступлений органических и биогенных веществ из затопленных почв, торфа в процессе формирования качества воды водоема-охладителя за длительный период времени, что создает научную базу для прогноза экологического состояния водоемов-охладителей атомных и тепловых электростанций.

При моделировании должны учитываться такие факторы, как массо- и теплоперенос, гидродинамика, кинетика множества одновременно протекающих процессов, которые почти не поддаются разграничению в натуральных условиях. Они характеризуют процессы формирования

качества воды как диффузные, плохо организованные системы [2, 3]. Задачи исследования и оптимизации таких систем успешно решаются с использованием идей и методов многомерной математической статистики. При этом существенно меняются представления о математическом описании явлений: понятие «физический закон» заменяется более широким понятием «математическая модель». Одну и ту же систему можно описывать различными моделями, специально оговаривая степень адекватности описания и те критерии, которые привлекаются для оценки адекватности.

Цель исследования: с помощью математической модели связи гидрохимических показателей качества воды в стоке из водоема и его верхней части дать прогноз экологического состояния водоема.

Методы исследования. Основные химические превращения компонентов водной среды при формировании гидрохимического режима в принципе могут быть адекватно описаны системой дифференциальных уравнений, составленных на основе законов химической кинетики и термодинамики. Эти уравнения позволяют прогнозировать динамику превращения компонентов воды в широком диапазоне изменения переменных факторов (температуры, концентраций растворенных веществ) в водоеме, но для их получения требуется глубокий теоретический анализ протекающих процессов, создание уни-

кальных компьютерных программ, большой объем вычислений.

Для решения оптимизационных задач более пригодны полиномиальные уравнения. При описании плохо организованных систем процессы фигурируют в виде «черного ящика» [3], а зависимости между входными и выходными параметрами представляются в виде уравнений регрессии. Коэффициенты регрессии интерпретируют как коэффициенты ряда Тейлора. Уравнения дают возможность с определенной точностью прогнозировать значения выходных параметров в области изученного факторного пространства, их можно использовать для оптимизации процессов. К достоинствам метода относится исключительная универсальность, возможность применять однотипные алгоритмы для моделирования и оптимизации разнообразных процессов [4].

Результаты исследований. Водоем-охладитель Березовской ГРЭС-1 сооружен в 1986 г. зарегулированием стока реки Береш в районе впадения в нее рек Базыр и Кадат. Мониторинг качества воды осуществляли отбором и анализом проб воды в течение десяти лет – с 1987 по 1996 г., с периодичностью 2 месяца (6 наблюдений в год); объем выборки составил 58 проб. На рисунке 1 представлена схема акватории водоема-охладителя, расположение и номера точек отбора проб.



Рис. 1. Схема акватории водоема-охладителя и расположения точек отбора проб воды

Контрольные точки 1, 2 и 3 расставлены в устьях рек. По результатам анализов проб воды в этих точках можно судить о составе и количестве загрязняющих веществ, поступающих в водоем с речным стоком. Точка 4 расположена в устье сбросного канала теплоэлектростанции, точка 5 – в левобережье, в районе торфяного месторождения. Пробы в точке 6 характеризуют качество воды в самой глубоководной центральной части водоема. Здесь происходит

усреднение свойств воды, поступающей из рек. В точке 7 контролируется качество воды в районе водозаборного канала электростанции. Пробы в точке 8 характеризуют качество воды в приплотинной части водохранилища; здесь происходит аккумуляция всех загрязнений, как аллохтонного, так и автохтонного происхождения.

В таблице 1 приведены характеристики выборки: контролируемые показатели, их минимальные (X_{min}) и максимальные (X_{max}) величины.

Таблица 1

Характеристика выборки показателей качества воды X_i

Показатель	Обозначения показателей	Размах варьирования	
		X_{min}	X_{max}
Температура, °С	X_1	0,1	29,5
Перманганатная окисляемость, мг/дм ³	X_2	5,3	110,2
Цветность, градусы цветности	X_3	0	240
Концентрация кислорода, мг/дм ³	X_4	1,2	18,1
Концентрация ионов аммония, мг/дм ³	X_5	0,05	6,54
Концентрация фосфат-ионов, мг/дм ³	X_6	0,01	0,75

Математический анализ результатов наблюдений дает возможность установить характер изменения качества воды стока из водоема-охладителя (в приплотинном участке, точка отбора проб 8). Состав воды в значительной степени зависит от поступлений химических ингредиентов с речным стоком, а ряд других параметров, таких как температура, цветность, концентрация растворенного кислорода, – от теплового сброса электростанции и автохтонных процессов. Количественную оценку этих зависимостей произвели методом математического моделирования. В соответствии с задачами и программой исследования, в качестве независимых переменных (факторов) использовали характеристики воды $X_1 \dots X_6$, перечисленные в таблице 1, в точках отбора проб 1–7, а в качестве выходных параметров (откликов) – те же характеристики в точке 8.

Зависимости выходных параметров от переменных факторов аппроксимировали линейными уравнениями регрессии общего вида:

$$X_{i,8} = b_{0,j} + \sum b_{i,j} X_{i,j}, \quad (1)$$

где первые подстрочные индексы $i = 1, \dots, 6$ – номера факторов (см. табл. 1); вторые подстрочные индексы $j = 1, \dots, 8$ – номера точек отбора проб (см. рис. 1). Численные значения свободных членов $b_{0,j}$ и коэффициентов регрессии $b_{i,j}$ определили методом наименьших квадратов, статистическую значимость членов регрессии – методом дисперсионного анализа (пакет прикладных программ Statgraphics Plus for Windows V.5) [4]. Незначимые члены (при критическом уровне значимости 5 %) исключили из уравнений с пересчетом коэффициентов регрессии в оставшихся членах. Результаты вычислений приведены в таблице 2. Все члены с коэффициентами $b_{i,6}$ и $b_{i,7}$ оказались незначимыми, они не включены в таблицу 2. В последней строке таблицы 2 – дисперсионные отношения Фишера $F_{эф}$, служащие для оценки эффективности моделей. Обычно полагают (хотя это формально не обосновано), что модели представляют практическую ценность, если $F_{эф} > 2$. В обсуждаемом исследовании все математические модели продемонстрировали высокую эффективность.

**Статистически значимые коэффициенты регрессии
и эффективности математических моделей**

Коэффициент	Показатель					
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
$b_{...,0}$	0,955	2,434	26,112	-4,398	0,101	0,020
$b_{...,1}$	–	–	–	1,160	–	–
$b_{...,2}$	0,438	0,315	–	-1,038	–	–
$b_{...,3}$	0,282	–	–	0,966	0,040	0,369
$b_{...,4}$	0,039	–	–	–	–	–
$b_{...,5}$	0,198	0,268	0,225	0,604	0,604	0,211
$F_{эф}$	12	46	38	18	32	13

Таким образом, уравнения регрессии (1) приобретают конкретный вид:

$$X_{1,8} = 0,955 + 0,438 X_{1,2} + 0,282 X_{1,3} + 0,039 X_{1,4} + 0,198 X_{1,5}; \quad (2)$$

$$X_{2,8} = 2,434 + 0,315 X_{2,2} + 0,268 X_{2,5}; \quad (3)$$

$$X_{3,8} = 26,112 + 0,225 X_{3,5}; \quad (4)$$

$$X_{4,8} = -4,398 + 1,160 X_{4,1} - 1,038 X_{4,2} + 0,966 X_{4,3} + 0,604 X_{4,5}; \quad (5)$$

$$X_{5,8} = 0,101 + 0,040 X_{5,3} + 0,604 X_{5,5}; \quad (6)$$

$$X_{6,8} = 0,020 + 0,369 X_{6,3} + 0,211 X_{6,5}. \quad (7)$$

Наглядное представление о качестве моделирования дают графики сопоставления наблюдавшихся натуральных измерений и вычисленных по моделям значений выходных параметров. На рисунке 2 приведен один из таких графиков – температура $X_{1,8}$. Большинство измеренных значений расположено вблизи диагональной прямой (геометрическое место вычисленных значений температуры), в 95 %-м доверительном интервале, обозначенном пунктирными линиями с обеих сторон прямой. Мы не приводим здесь графики для пяти других выходных параметров, так как они имеют аналогичный вид. Результаты моделирования можно считать успешными, учитывая высокий уровень «зашумленности» на природном объекте.

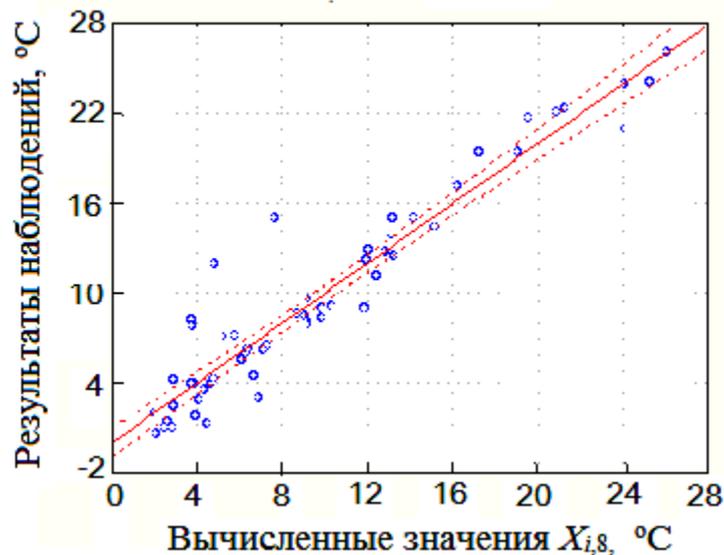


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные значения температуры

В уравнениях регрессии присутствуют только члены первого порядка, что позволяет обсудить основные закономерности формирования качества воды в приплотинной части непосредственно по величинам коэффициентов регрессии.

Температура воды на выходе из водоема-охладителя $X_{1,8}$ существенно зависит от температуры воды речного стока р. Береш: величина коэффициента $b_{1,2}$ в уравнении (1) – самая большая. Коэффициент $b_{1,3}$, характеризующий степень влияния стока р. Кадат, по величине примерно в полтора раза меньше. Коэффициент $b_{1,6}$, показывающий вклад температуры воды в центральной части водоема в формирование температуры на выходе, вдвое меньше, чем вклад стока р. Береш. Величина коэффициента $b_{1,4}$, отражающего вклад температуры воды в устье сбросного канала, на порядок меньше, чем влияние стоков рек Береш и Кадат. Проведенными ранее натурными исследованиями [5] установлено, что тепловой сброс электростанции непосредственно не повышает температуру воды в приплотинной части водоема. Все члены уравнения имеют положительные знаки, т. е. увеличение температуры в исходных точках приводит к повышению температуры на выходе из водоема.

Показатель перманганатной окисляемости $X_{2,8}$ характеризует содержание растворенного органического вещества на выходе из водоема. Наибольшее влияние на него оказывает качество воды в устье р. Береш и в районе основного торфяника (точки контроля 2 и 5). Река Береш имеет самый большой объем стока, который вносит существенный вклад в суммарное содержание растворенного органического вещества. Немного меньшее влияние оказывает растворенное органическое вещество, которое продуцируется торфяником. Действия этих факторов направлены в сторону увеличения показателя окисляемости.

Величина показателя цветности воды на выходе из водоема $X_{3,8}$ обусловлена только процессами разложения основного торфяного месторождения и растворением окрашенных составляющих торфа – фульвокислот и гуминовых соединений.

Трансформация растворенного в воде кислорода имеет сложный характер. Его запасы

пополняются за счет растворения атмосферного кислорода и снижаются из-за расходования на окисление содержащихся в воде органических веществ. Кроме того, этот фактор наиболее подвержен сезонным колебаниям. Детальное обсуждение всех нюансов выходит за рамки настоящего сообщения, оно имеется в публикации [1].

Содержание аммонийного азота на выходе из водоема $X_{5,8}$ зависит, главным образом, от интенсивности его образования при разложении торфа, в значительно меньшей степени – от поступления со стоком р. Кадат.

Показатель концентрации фосфат-ионов $X_{6,8}$ формируется за счет поступлений из затопленного торфяника (точка отбора проб 5) и заторфованного устья р. Кадат (точка 3), а также за счет антропогенного загрязнения стока этой реки.

Выводы

1. Между свойствами воды в характерных областях акватории водоема-охладителя тепловой электростанции, с одной стороны, и в приплотинной области стока, с другой стороны, существуют аддитивные причинно-следственные зависимости, поддающиеся математическому моделированию методами регрессионного анализа.

2. Математическое моделирование может служить методологической основой оптимизации качества воды водоемов-охладителей ТЭС для технологических целей и аквакультуры.

Литература

1. Морозова О.Г., Пен Р.З., Репях С.М. Особенности формирования гидрохимического режима водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 214 с.
2. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. – СПб.: Наука, 2000. – 147 с.
3. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
4. Пен Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics. – Красноярск: Кларетианум, 2003. – 246 с.

5. Морозова О.Г. и др. Мониторинг качества воды водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2002. – Т. 45, вып. 2. – С. 144–147.
2. Alimov A.F. Jelementy teorii funkcionirovanija vodnyh jekosistem.– SPb.: Nauka, 2000. – 147 s.
3. Nalimov V.V. Teorija jeksperimenta. – M.: Nauka, 1971. – 208 s.
4. Pen R.Z. Planirovanie jeksperimenta v Statgraphics. – Krasnojarsk: Klaretianum, 2003. – 246 s.
5. Morozova O.G. i dr. Monitoring kachestva vody vodoema-ohladiatelja Berезovskoj GRJeS-1 // Izv. vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija. – 2002. – Т. 45, вып. 2. – С. 144–147.

Literatura

1. Morozova O.G., Pen R.Z., Repjah S.M. Osobennosti formirovanija gidrohimicheskogo rezhima vodo-ema-ohladiatelja Berезovskoj GRJeS-1. – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2001. – 214 s.



УДК 621.398

*А.А. Кирилин, Н.М. Попов,
Д.М. Олин*

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ СИГНАЛОВ ПО СИЛОВОЙ СЕТИ 0,38 кВ

*А.А. Kirilin, N.M. Popov,
M.D. Olin*

THE CHANGE IN VOLTAGE OF ZERO SEQUENCE DURING THE SIGNALING ON POWER NETWORK 0.38 kV

Кирилин А.А. – ассист. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваево. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Попов Н.М. – д-р техн. наук, проф. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваево. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Олин Д.М. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваево. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Kirilin A.A. – Asst, Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region Kostroma District, V. Karavaevo. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Popov N.M. – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, V. Karavaevo. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Olin D.M. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, V. Karavaevo E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Расположение сельскохозяйственных предприятий в районах с низко развитой коммуникационной сетью делает перспективной раз-

работку способов электросвязи по силовым проводам, непосредственно питающим электроустановки. Поэтому на кафедре