

УДК 556. 621.311.21

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

КОМПЛЕКСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БГРЭС-1

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

COMPLEX CHARACTERISTIC OF WATER QUALITY OF BGRES-1 WATER-COOLER

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

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

Супрун С.А. – директор МП МУК «Красноярская», г. Красноярск. E-mail: ogmorozova45@mail.ru

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

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

Suprun S.A. – Director, MUE 'Krasnoyarskaya', 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

Систематизация качества природных вод на основе различных критериев способствовала разработке различных классификаций загрязненности вод. В настоящее время не существует единого общепринятого метода комплексной оценки загрязненности водных объектов. При этом разработаны единичные, косвенные и комплексные показатели загрязнения по гидрохимическим и санитарно-биологическим и другим показателям. Понятие «комплексная оценка загрязненности природных вод» в настоящее время не стандартизировано, это понятие принято в связи с необходимостью иметь достоверную информацию об уровне совокупного загрязнения и должно давать адекватную оценку степени загрязненности водного объекта. При натурных измерениях качества воды водного объекта получают целый ряд характеристик; совокупная оценка качества воды требует учета вклада каждой из характеристик. Одним из

возможных путей решения этой задачи является «свертка» информации – создание глобального скалярного критерия (интегрального критерия качества). Комплексная оценка загрязнения воды водоема-охладителя БГРЭС-1 в различные временные периоды его функционирования дает возможность определить закономерные фазы развития экосистемы водного объекта, начиная с периода заполнения, других периодов становления экологического статуса; разрабатывать рекомендации по улучшению качества воды. Интегральная экологическая характеристика, основанная на гидрохимических и гидробиологических показателях качества воды, отражает сложный характер взаимодействий в природно-техногенной системе «теплоэлектростанция – окружающая среда». Она позволяет объективно оценить общее направление изменения гидрохимических и гидробиологических пара-

метров качества воды водоема-охладителя в различные периоды его существования.

Ключевые слова: водоем-охладитель, качество воды, гидрохимические, гидробиологические показатели, комплексная оценка загрязненности, глобальный скалярный критерий.

The systematization of natural water quality on the basis of various criteria promoted the development of various classifications of water impurity. Nowadays there is no uniform standard method of complex assessment of the impurity of water objects. Thus single, indirect and complex indicators of pollution on hydrochemical and sanitary and biological and other indicators are developed. The concept "complex assessment of impurity of natural water" is not standardized nowadays; this concept is accepted due to the need of reliable information about the level of cumulative pollution and has to give adequate assessment to the degree of impurity of water objects. At natural measurements of water quality of water object a number of characteristics; cumulative assessment of quality of water demands the accounting of the contribution of each characteristic are received. One of possible solutions of this task of "convolution" of information is the creation of global scalar criterion (integrated criterion of quality). Complex assessment of water pollution of the reservoir cooler of BGRES-1 during various temporary periods of its functioning gives the chance to define natural phases of development of the ecosystem of water object since the period of filling, other periods of formation of ecological status; to develop recommendations on the improvement of water quality. Integrated ecological characteristic based on hydrochemical and hydrobiological indicators of water quality reflects difficult nature of interactions in natural and technogenic system "thermal power plant – environment". It allows objective estimating of general direction of change of hydrochemical and hydrobiological parameters of water quality of reservoir cooler at various periods of its existence.

Keywords: reservoir cooler, water quality, hydrochemical, hydrobiological indicators, complex assessment of pollution, global scalar criterion.

Введение. Сведения о химическом составе и биологических объектах в природной воде,

которая используется во всех сферах человеческой деятельности, необходимы для знания о характере и степени загрязнения водного объекта. Список веществ, для которых установлены предельно допустимые концентрации (ПДК), включает более 1000 наименований. Систематизация качества природных вод на основе различных критериев способствовала разработке различных классификаций загрязненности вод. В настоящее время не существует единого общепринятого метода комплексной оценки загрязненности водных объектов. При этом разработаны единичные, косвенные и комплексные показатели загрязнения по гидрохимическим, санитарно-биологическим и другим показателям.

Понятие «комплексная оценка загрязненности природных вод» в настоящее время не стандартизировано, оно принято в связи с необходимостью иметь достоверную информацию об уровне совокупного загрязнения и должно давать адекватную оценку степени загрязненности водного объекта. При натурных измерениях качества воды водного объекта получают целый ряд характеристик. Совокупная оценка качества воды требует учета вклада каждой из характеристик, что часто оказывается непросто задачей. Одним из возможных путей решения этой задачи является «свертка» информации – создание глобального скалярного критерия (интегрального критерия качества).

Цель и задачи исследований. Разработать комплексный критерий качества воды водоема-охладителя БГРЭС-1 для характеристики экологического статуса водоема-охладителя в различные периоды его существования путем исследования гидрохимических и гидробиологических характеристик воды. Используя этот критерий, можно составить рекомендации по различным мелиоративным мероприятиям, способным оптимизировать характеристики качества воды для технологических целей и экологической безопасности территории топливно-энергетического комплекса.

Комплексная оценка загрязнения воды водоема-охладителя БГРЭС-1 в различные временные периоды его функционирования дает возможность обозначить закономерные фазы развития экосистемы водного объекта, начиная

с периода заполнения, и разрабатывать рекомендации по улучшению качества воды.

Объекты и методы исследований. Водоем-охладитель Березовской ГРЭС-1 сооружен в 1986 г. зарегулированием стока реки Береш в районе впадения в нее рек Базыр и Кадат на территории Шарыповского района.

Мониторинг качества воды проводили в течение десяти лет – с 1987 по 1996 г.; отбор и анализ проб воды осуществляли с периодичностью 2 месяца (6 наблюдений в год); объем выборки составил 58 проб [1, 2]. На рисунке 1 представлена схема акватории водоема-охладителя, расположение и номера точек отбора проб.



Рис. 1. Водоем-охладитель БГРЭС-1 (цифрами обозначены места и номера отбора проб)

Результаты исследований и их обсуждение. При натурных измерениях качества воды получают целый ряд характеристик. Совокупная оценка качества воды требует учета вклада каждой из характеристик, что часто оказывается непростой задачей. Одним из возможных путей решения этой задачи является «свертка» информации – создание глобального скалярного критерия (интегрального критерия качества) $w(\mathbf{y})$

$$w(\mathbf{y}) = w(y_1, \dots, y_p), \quad (1)$$

где y_1, \dots, y_p – значения индивидуальных характеристик воды.

Обычно в конкретных случаях можно сформулировать требования, которым должно удовлетворять качество воды, то есть назвать хорошие и плохие значения каждой из индивидуальных характеристик y_j , а также веса этих характеристик – их сравнительную важность при

оценке качества в целом. Одна из трудностей конструирования интегрального критерия качества состоит в том, что индивидуальные характеристики различаются по физической природе и измерены в разных масштабах. Эту трудность преодолевают путем перехода от натуральных значений индивидуальных характеристик y_j к безразмерным нормированным величинам – частным «функциям полезности» d_j

$$d_j = f_j(y_j); \quad 0 \leq d_j \leq 1. \quad (2)$$

Переход от y_j к d_j осуществляют таким образом, чтобы предпочтительным значениям y_{ju} соответствовали более высокие значения d_{ju} . В результате преобразования любое отношение предпочтения на множестве N значений каждой j -й индивидуальной характеристики ($j = 1, 2, \dots, p$) в наборе проб воды $1, 2, \dots, u, \dots, N$

$$y_{j1} \} y_{j2} \} \dots \} y_{jN} \quad (3)$$

(знак «}» здесь использован вместо слов «лучше, чем») переводится в отношение сравнения

$$d_{j1} > d_{j2} > \dots > d_{jN}. \quad (4)$$

Функция (2) является гомоморфным образом реально измеряемых характеристик [3], поэтому на множестве значений d_j определены те же математические операции, что и на множестве y_j . Это позволяет заменить выражение (1) на выражение

$$W(y) = W(d_1, \dots, d_p). \quad (5)$$

Во многих случаях можно принять, что функции (2) линейны относительно y_j во всем диапазоне изменения индивидуальных характеристик, поэтому выражение для вычисления d_j может быть представлено в виде

$$d_j = \frac{y_{ju} - y_j^{(-)}}{y_j^{(+)} - y_j^{(-)}}, \quad (6)$$

где $y_j^{(+)}$ и $y_j^{(-)}$ – соответственно лучшие и худшие значения индивидуальных характеристик воды в пределах выборки. В определении точных значений $y_j^{(+)}$ и $y_j^{(-)}$ нет необходимости; желательнее только, чтобы их выбор обеспечил выполнение условия $0 \leq d_j \leq 1$.

В качестве функции (5) часто применяют средневзвешенный (среднеарифметический с весами) интегральный критерий

$$W = \frac{\sum_{j=1}^p \delta_j d_j}{\sum_{j=1}^p \delta_j}. \quad (7)$$

Множители δ_j представляют собой веса соответствующих индивидуальных характеристик. Удобно (но не обязательно) выбирать значения весов в интервале $0 \leq \delta_j \leq 1$. Более важные характеристики входят в выражение (7) с наиболь-

шими весами. Второстепенным характеристикам присваивают меньшие веса.

Следует подчеркнуть, что интегральный критерий качества W лишь ранжирует различные совокупности значений индивидуальных характеристик (в смысле их предпочтительности) на множестве состояний изучаемого объекта. Значения W не могут сравниваться при изменении числа индивидуальных характеристик, законов перехода $y \rightarrow d$ или весов δ .

В исследовании использовали результаты наблюдений в точках 1...8 (см. рис. 1) за 10-летний период [4]. Для оценки качества воды привлекли шесть индивидуальных характеристик ($p = 6$):

y_1 – цветность воды, градусы цветности ($y_1^{(-)} = 240$; $y_1^{(+)} = 0$);

y_2 – прозрачность воды, см ($y_2^{(-)} = 20$; $y_2^{(+)} = 250$);

y_3 – концентрация растворенного кислорода, мг/дм³ ($y_3^{(-)} = 1,2$; $y_3^{(+)} = 18,1$);

y_4 – концентрация ионов аммония, мг/дм³ ($y_4^{(-)} = 6,54$; $y_4^{(+)} = 0,05$);

y_5 – перманганатная окисляемость, мг/дм³ ($y_5^{(-)} = 110,2$; $y_5^{(+)} = 5,3$);

y_6 – химическое потребление кислорода, мг/дм³ ($y_6^{(-)} = 89,1$; $y_6^{(+)} = 1,8$).

Значения интегральных критериев качества для всех проб воды (объем выборки $N = 58$) вычислили по формулам (6) и (7).

Характеристики W в каждой точке отбора проб – средние W_{cp} , минимальные $W_{мин}$ и максимальные $W_{макс}$ значения, среднеквадратичные стандартные отклонения S_W – приведены в таблице 1.

На рисунке 2 показана динамика изменения величины W_1 в первой точке отбора проб (в районе устья реки Базыр), на рисунке 3 – линия тренда, полученная сглаживанием результатов наблюдений W_1 по методу проинтегрированного скользящего среднего (модель AROMA) с шириной окна 5 наблюдений [4]. На этих рисунках видно, что за время наблюдений величина W_1 дважды опускалась до своего минимального значения: в зимние месяцы конца 1989 – начала 1990 и конца 1991 – начала 1992 годов.

Таблица 1

Статистические характеристики интегральных критериев качества воды по точкам отбора проб

Номер точки отбора проб	W_{cp}	$W_{мин}$	$W_{макс}$	S_w
1	0,774	0,677	0,855	0,00146
2	0,768	0,654	0,849	0,00165
3	0,663	0,513	0,787	0,00364
4	0,700	0,566	0,804	0,00286
5	0,609	0,429	0,745	0,00607
6	0,759	0,674	0,847	0,00158
7	0,751	0,591	0,816	0,00204
8	0,726	0,545	0,824	0,00311



Рис. 2. Динамика изменения критерия W в первой точке отбора проб

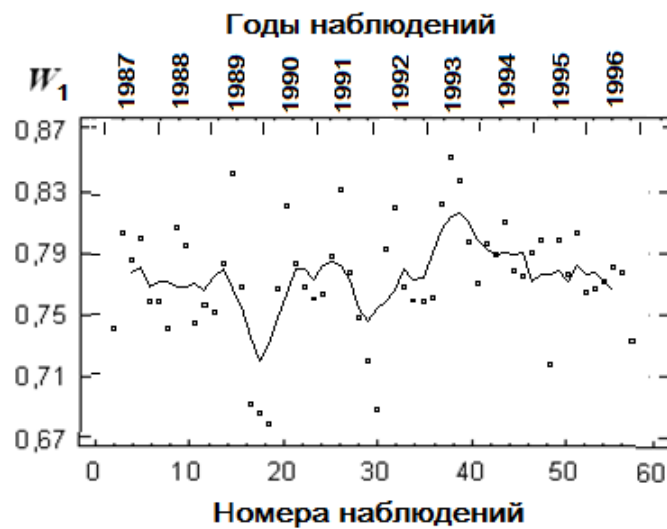


Рис. 3. Величина критерия W (точки) и его многолетний тренд (сплошная линия) в первой точке отбора проб

Методом спектрального Фурье-анализа установлено наличие сезонной периодичности в изменении величины W_1 . Интенсивный пик на пе-

риодограмме при частоте 0,167 (шесть отборов проб воды в течение года) (рис. 4) соответствует естественной периодичности в один год.

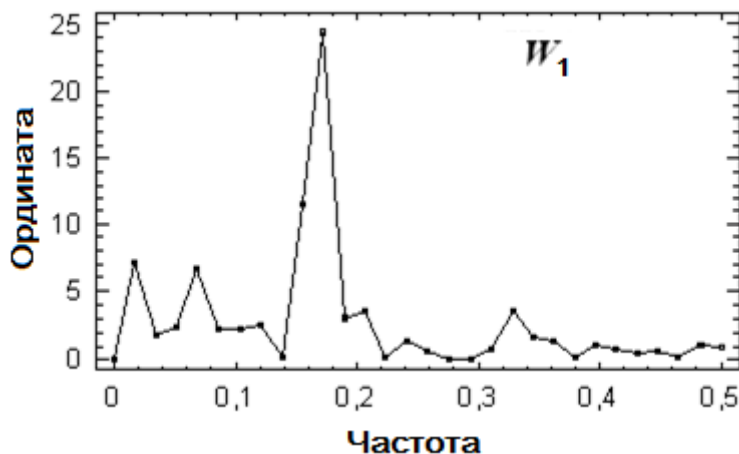


Рис. 4. Периодограмма критерия W в первой точке отбора проб

Аналогичный статистический анализ выполнен для остальных семи точек отбора проб [1]. Отмеченные выше закономерности характерны для всех точек, но выражены в большей или меньшей степени. Они четко проявились в точках 1, 2, 3, 4 и 5, менее отчетливо – в точках 6, 7 и 8.

Ухудшение качества воды в зимние месяцы 1989–1990 и 1991–1992 годов отмечено почти по всей акватории водоема. В наибольшей степени это проявилось в устьях рек (точки отбора проб 1, 2 и 3), а также в районе устья сбросного канала и на приплотинном участке (точки отбора проб 4 и 8). Наихудшее качество воды стабильно сохранялось в течение всего периода наблюдений в районе основного торфяного месторождения (точка отбора проб 5). В этой части акватории зафиксированы самые низкие значения критериев: $W_{cp} = 0,609$; $W_{мин} = 0,429$; $W_{макс} = 0,745$ (см. табл. 1). Резкое нарастание неблагоприятной экологической ситуации возникло из-за негативных процессов при всплывании торфа в начальном периоде заполнения водоема.

Тенденция к ухудшению качества воды после 1994 г. (рис. 2, 3) особенно заметно проявилась в точках отбора проб 4, 5 и 6. Ухудшение экологической обстановки в районе сбросного канала и в центральной части водоема совпало с началом работы одновременно двух тепловых блоков электростанции, что привело к

значительному повышению температуры воды, в первую очередь в районе точек 4 и 6.

Поскольку в пределах водоема имеет место перемещение и перемешивание воды и усреднение ее свойств, естественно проявление корреляционных связей между критериями W в разных точках отбора проб. Матрица коэффициентов парной линейной корреляции приведена в таблице 2. Почти все коэффициенты корреляции статистически значимы (при уровне значимости 5 %), однако в большинстве случаев относительно невелики по абсолютной величине.

Анализ структуры корреляционной матрицы методом многомерного факторного анализа [5–7] выявил существование единственного латентного фактора, обуславливающего 77,0 % суммарной дисперсии свойств воды W по всем точкам отбора проб.

В динамике изменений и в других характеристиках этого фактора прослеживаются те же особенности, которые были отмечены выше в характере изменений критерия W . За время наблюдений величина фактора дважды достигала своего максимального значения – в зимние месяцы 1989–1990 и 1991–1992 годов и проявляла тенденцию к увеличению после 1994 г. По-видимому, с достаточно высокой степенью вероятности, природу этого фактора можно отождествить с антропогенным воздействием на водоем.

Матрица парных линейных корреляций свойств воды

W_j	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8
W_1	1	0,829	0,545	0,682	0,489	0,532	0,598	0,594
W_2	0,829	1	0,466	0,622	0,340	0,441	0,633	0,491
W_3	0,545	0,466	1	0,634	0,350	0,256	0,428	0,562
W_4	0,682	0,622	0,634	1	0,622	0,514	0,665	0,635
W_5	0,489	0,340	0,350	0,622	1	0,738	0,493	0,481
W_6	0,532	0,441	0,256	0,514	0,738	1	0,703	0,625
W_7	0,598	0,633	0,428	0,665	0,493	0,703	1	0,796
W_8	0,594	0,491	0,562	0,635	0,481	0,625	0,796	1

На долю других латентных факторов, а также случайных воздействий («шумового фона») приходится только 23 % дисперсии W . Для рассмотрения второго и последующих латентных факторов нет оснований, так как связанные с каждым из них собственные числа матрицы корреляций оказались меньше единицы.

Выводы. Нормативы и методы оценки качества водной среды, разработанные для водоемов с естественным температурным режимом, на водоемах-охладителях могут иметь лишь ограниченное применение.

Комплексная оценка загрязнения воды водоема-охладителя БГРЭС-1 в период от начала заполнения водоема до периода стабилизации характеристик, т.е. в различные временные периоды его функционирования, дает возможность определить закономерные фазы развития экосистемы водного объекта, начиная с периода заполнения, разрабатывать рекомендации по улучшению качества воды.

Интегральная экологическая характеристика, основанная на гидрохимических и гидробиологических показателях качества воды, отражает сложный характер взаимодействий в природно-техногенной системе «теплоэлектростанция – окружающая среда», она позволяет объективно оценить общее направление изменения гидрохимических и гидробиологических параметров качества воды водоема-охладителя в период заполнения, становления и изменения его экологического статуса.

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., Камоза Т.Л., Колюченко И.Н. [и др.]. Проблемы эксплуатации водоема-охладителя на примере Березовской ГРЭС-1 // Теплоэнергетика. – 2017. – № 8. – С. 81–88.
 3. Карташова Т.М., Штаркман Б.П. Обобщенный критерий оптимизации – функция желательности // Информационные материалы Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР. – 1970. – № 8 (45). – С. 55–60.
 4. 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 г. – Красноярск, 2012.
 5. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 352 с.
 6. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С. [и др.]. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
 7. Statgraphics Centurion XV. User Manual. – URL: www.statgraphics.com. – USA, 2005. – 295 p.

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., 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. – 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

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

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

Suprun S.A. – Director, MUE 'Krasnoyarskaya', Krasnoyarsk. E-mail: 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

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

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-