

О возможности использования эмпирической функции распределения для количественной оценки вероятности превышения нормативов по цветности

© 2024. А. В. Ялалетдинова, к. т. н., доцент, М. А. Малкова, к. х. н., доцент, Л. В. Еникеева, к. ф-м. н., доцент, Е. А. Кантор, д. х. н., профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450062, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1, e-mail: hawk22.89@mail.ru

Установлено, что характер распределения значений цветности воды в рамках года зависит от сезонности, поэтому для учёта этого фактора дальнейший анализ распределения показателя произведён для каждого месяца. В качестве примера приведён анализ распределений цветности для января, мая, июля и октября. Для каждого месяца выстроены вариационные ряды и рассчитаны эмпирические функции распределения цветности воды. Выявлено, что законы распределения цветности не соответствуют нормальному и логнормальному распределениям, но достаточно точно аппроксимируются полиномами (теоретической функцией распределения). Для полученных полиномов выявлены области определения значений аргумента x , при которых они обладают всеми свойствами функций распределения (непрерывно возрастают на отрезке $[0; 1]$). Гипотезы о законах распределения цветности, проверенные с помощью критерия согласия Колмогорова, подтвердились. Используемая методология и полученные функции распределения цветности воды дали возможность рассчитать вероятности превышения показателем заданных значений, например, превышения норматива (20 град) для всех месяцев. Так, в январе вероятность того, что превышения норматива не произойдет, составляет 0,792, в июле 0,562, в октябре 0,809, тогда как в мае, вероятность того, что норматив по цветности не будет превышен, составляет 0,091. Знание закона распределения цветности воды, учитывающего сезонные особенности изучаемого процесса, позволяет оценить риски превышения показателем нормативных значений и использовать для принятия решений по обеспечению нормативного качества воды по показателю цветности.

Ключевые слова: качество воды, цветность воды, эмпирическая функция распределения, теоретическая функция распределения, критерий согласия Колмогорова, вероятность события.

On the possibility of using the empirical distribution function to quantify the probability of exceeding the water color standards

© 2024. A. V. Yalaletdinova ORCID: 0000-0003-0883-1856, M. A. Malkova ORCID: 0000-0002-3570-4062, L. V. Enikeeva ORCID: 0000-0003-4219-4870, E. A. Kantor ORCID: 0000-0002-9629-3324, Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov St., Ufa, Russia, 450062, e-mail: hawk22.89@mail.ru

We found that the nature of the distribution of water color values within a year depends on seasonality. Therefore, to take into account the above, further analysis of the distribution of the indicator was carried out for each month. The analysis of water color distributions for January, May, July and October is given as an example. Variation series were plotted and empirical water color distribution functions were calculated for each month. It is revealed that the laws of water color distribution do not correspond to normal and log-normal distributions, but are approximated quite accurately by polynomials (theoretical distribution function). For the obtained polynomials, the domains of definition of the values of the argument x , at which they have all the properties of the distribution function (continuously increase on the interval $[0; 1]$) are revealed. The hypotheses about the laws of water color distribution tested using Kolmogorov–Smirnov test were confirmed. The methodology used and the resulting water color distribution functions made it possible to calculate the probabilities of an indicator exceeding the specified values, for example, exceeding the standard (20 degrees) for all months. Thus, in January, the probability of not exceeding the standard will be 0.792, in July – 0.562, in October – 0.809, while in May the probability of not exceeding the water color standard is 0.091. Knowledge of the law of water color distribution, taking into account the seasonal characteristics of the studied process, allows to assess the risks of exceeding normative values by the indicator and to use it for making decisions on ensuring normative water quality in terms of color.

Keywords: water quality, water color, empirical distribution function, theoretical distribution function, Kolmogorov–Smirnov test, event probability.

Природная вода как сложная многофазная система, содержит множество разнообразных минеральных и органических примесей, которые образуются в результате влияния ряда факторов, а также зависят от типа водозабора и расположения источника воды [1–3]. Водозабора крупными городскими агломерациями, в которых сосредоточены предприятия нефтехимической, нефтеперерабатывающей, машиностроительной и строительной промышленности, свойственно влияние не только природных, но и техногенных факторов [4, 4–7]. Поступление загрязнителей различной природы дополняет природные показатели воды техногенными компонентами [8–12]. Например, входящее в состав цветности окрашенное органическое вещество трансформируется и соединяется с органическим веществом техногенного происхождения: бенз(а)пиреном, тяжёлыми металлами (медь, цинк, свинец), фенолами, аминами [13–19]. Помимо антропогенного воздействия предприятий для поверхностных водозаборов, в отличие от инфильтрационных, свойственны сильные годовые климатические колебания основных технологических показателей водоподготовки [2, 3, 20–23], в том числе и цветности [24, 25]. Эффективность работы очистных сооружений водоподготовки в периоды ухудшения качества воды заключается в контроле изменения показателей [24], которые зачастую колеблются в широком диапазоне значений. Поэтому нахождение вероятностей возникновения событий, для которых характерен высокий или низкий уровень загрязнения воды, позволит регулировать процесс водоочистки.

Целью работы является построение математической модели, описывающей сезонный характер распределения цветности воды, фиксируемой в створе поверхностного водозабора, и нахождение вероятности наступления ситуаций, при которых показатель превысит или не превысит заданные значения.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования являются ежедневные данные по цветности воды в створе поверхностного водозабора (ПВ), расположенного на реке Уфа. Пробы воды из р. Уфы отбирались ежедневно в период с 1994 по 2021 гг. согласно ГОСТ Р 59024-2020 и ГОСТ 17.1.5.05-85 на предприятии ГУП РБ «Уфаводоканал».

Река Уфа является основным источником водоснабжения для г. Уфы [26]. Большая её

часть располагается на территории Республики Башкортостан, поэтому на химический состав воды в реке влияют не только предприятия химического и нефтехимического профиля, но и геологические особенности территории [27]. Впадающие в р. Уфу притоки (свыше 280) [27] незначительно влияют на её химический состав [26]. Качество воды в реке определяется водами Павловского водохранилища (около 80%) [2], и качеством подземных вод, разгружающихся в реку [26]. Эксплуатируемые в долине реки водоносные горизонты формируются в том числе за счёт поступления в них поверхностного стока [28].

Статистическая обработка данных заключалась в построении полигона относительных частот цветности, произведённого на основе исходных данных, определении эмпирической и теоретической функций распределений цветности, и проверке гипотез об их соответствии.

Для построения полигона относительных частот область значений цветности делилась на интервалы длиной k , рассчитывались границы каждого интервала ($x_{\min i}$, $x_{\max i}$), находились частоты (n_i) и относительные частоты ($w_i = n_i/n$) попадания значений цветности в i -ый интервал.

Ранее нами производилось вычисление вероятности появления экстремально больших значений цветности путём аппроксимации полигона относительных частот w_i в хвосте распределения степенной функцией вида $\rho(x) = A \cdot x^{-1-\alpha}$ [2]. Однако этот метод не даёт возможности оценить вероятность того, что цветность примет как малые, так и большие значения, либо попадёт в некоторый интервал.

Поэтому предлагается произвести аппроксимацию эмпирической функции распределения цветности, полученную на основе ряда значений накопленной относительной частоты $F_n(x)$, которая вычисляется кумулятивным способом и принимает значения от 0 до 1 для всех интервалов. Таким образом, значения $F_n(x)$ можно интерпретировать как эмпирическую вероятность того, что значение случайной величины X не превысит значение аргумента x : $F(x) = P(X < x)$.

Аппроксимация эмпирической функции распределения $F_n(x)$ какой-либо функцией позволила вычислить теоретическую функцию распределения $F(x)$.

Проверка гипотез о соответствии эмпирического распределения цветности воды нормальному и логнормальному законам распределения вероятностей [29] производилась по критерию χ^2 Пирсона [30], а о соответствии

эмпирического и теоретического распределений – по критерию согласия Колмогорова [30]. Для этого находилась мера расхождения между теоретическим и эмпирическим распределением $D = \max |F_n(x) - \hat{F}(x)|$. Затем вычислялась величина $\lambda = D\sqrt{n}$, где n – объём выборки. По выбранному уровню значимости α (0,05) выбиралось табличное значение $\lambda_\alpha(1,36)$. В случаях, когда $\lambda \leq \lambda_\alpha$, считается, что гипотеза не противоречит опытным данным.

Функция распределения случайной величины должна быть непрерывной и монотонно возрастающей на отрезке $[0; 1]$ [30], поэтому предполагается, что функция $\hat{F}(x)$ удовлетворяет этим требованиям при значениях аргумента $x \in [x_1; x_2]$. Однако стоит учитывать, что аппроксимация $\hat{F}(x)$ основана на выборке, множество значений которой ограничивается отрезком $[x_{min}; x_{max}]$, то есть минимальным и максимальным значениями в выборке, а значит, выполняет все свойства функции распределения на этом отрезке.

Поэтому область определения теоретической функции распределения стоит принимать из условия:

$$x \in [x_1; x_2] \subset [x_{min}; x_{max}] \quad (1)$$

Результаты и обсуждение

Для цветности воды объём выборки n за период с 01.01.1994 г. по 31.12.2021 г. (ежедневные наблюдения) составляет 10227 значений. В апреле–мае, с увеличением расходов воды в реке, происходит рост значений цветности

воды, объясняющийся размывом потоками воды донных наносов. Однако, увеличение цветности воды происходит под влиянием и других факторов, например, смыва гумусовых и дубильных веществ с ландшафта или поступления в реку органического вещества аллохтонного происхождения [31–33]. В этой связи цветность можно рассматривать как случайную величину (рис. 1).

Исходя из исходной выборки n произведено построение полигона относительных частот и проанализировано распределение цветности за весь период наблюдений (рис. 2).

Большая часть наблюдений попадает в первый интервал (до 27 град), оставшиеся – формируют длинный хвост распределения, по которому производят оценку вероятности появления экстремальных значений цветности. Однако, полученное распределение цветности не учитывает сезонных особенностей изменения показателя. Например, во время паводков цветность достигает больших значений, тогда как в другие периоды колеблется в пределах некоторого интервала, в результате чего превышение норматива СанПиН 1.2.3685-21, равного 20 град, в феврале или августе – события практически невозможные и их вероятность стремится к нулю. Для учёта фактора сезонности нами исследованы закономерности распределения цветности для каждого месяца, в качестве примера приведены характеристики выборок января, мая, июля и октября (табл. 1).

Для каждой из выборок определены границы интервалов, вычислены относительные частоты w_i (рис. 3) и значения эмпирической функции распределения $F_n(x)$ (табл. 2).

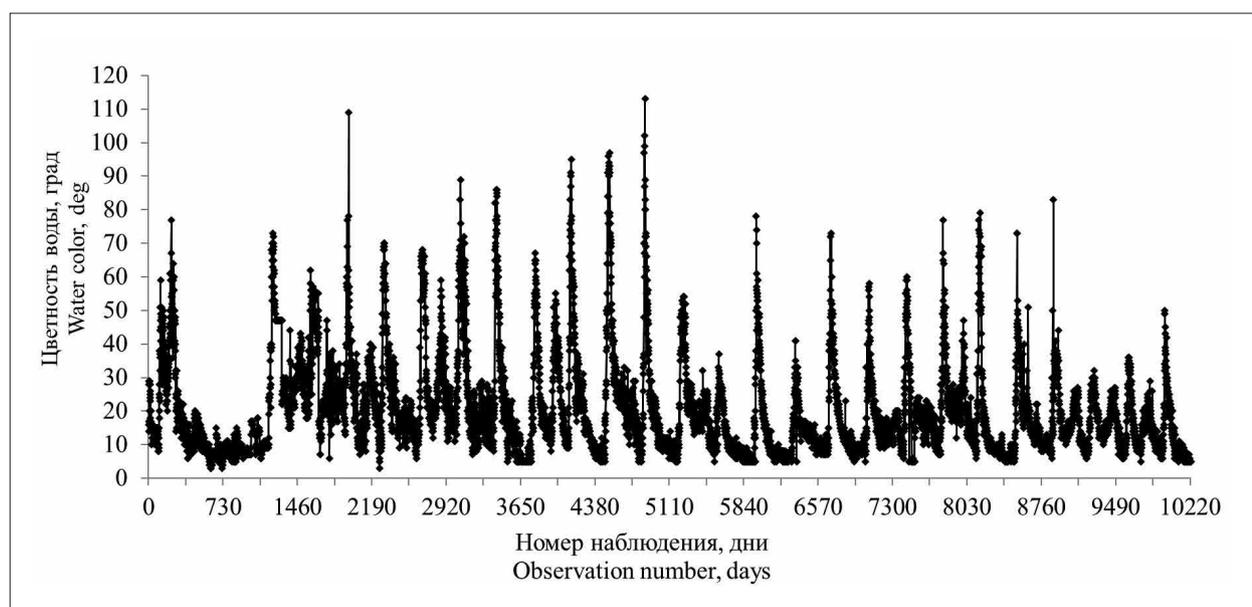


Рис. 1. Ежедневные значения цветности воды в 1994–2021 гг.
Fig. 1. Daily water color values from 1994–2021

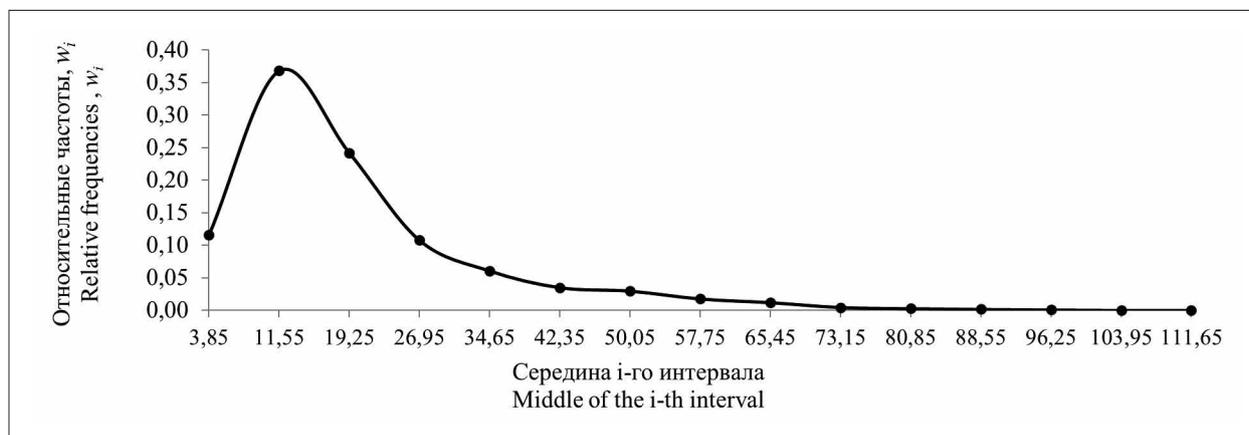


Рис. 2. Полигон относительных частот цветности воды за весь период наблюдений
 Fig. 2. Polygon of relative frequencies of water color for the entire period

Таблица 1 / Table 1

Характеристики выборок цветности воды для января, мая, июля и октября
 Water color characteristics for January, May, July and October

Месяц Month	Объём выборки n_i Sample size n_i	Значение показателя (град) Indicator values (deg)		Ширина интервала ΔS Interval width ΔS
		x_{min}	x_{max}	
Январь / January	866	5,0	40,0	8,0
Май / May	866	5,0	97,0	5,0
Июль / July	866	5,0	56,0	10,0
Октябрь / October	868	5,0	47,0	8,0

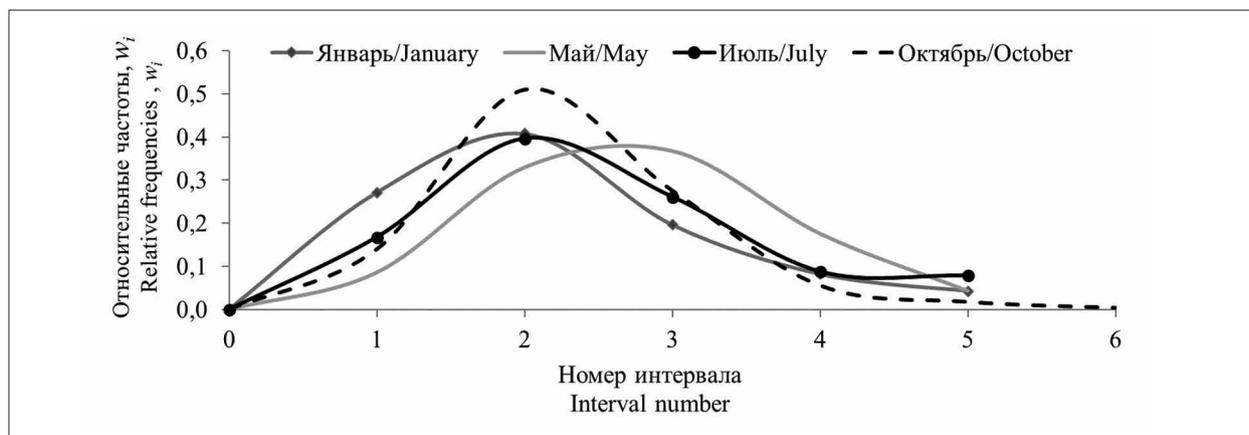


Рис. 3. Полигон относительных частот цветности воды
 Fig. 3. Polygon of water color relative frequencies

По критерию χ^2 Пирсона проверена и отклонена гипотеза о соответствии эмпирических распределений нормальному закону [30]. Затем произведена аппроксимация значений эмпирических функций распределения $F_n(x)$ полиномами, как наиболее простыми (табл. 3, рис. 4).

Область допустимых значений аргумента x функций определяется согласно (1) (табл. 4).

За довольно большой период времени с 1994 по 2021 гг. в каждом из исследуемых

периодов значения показателя ни разу не превысили x_{max} и не снижались ниже x_{min} . Поэтому можно считать вероятность того, что цветность не превысит x_{max} , равной 1, а вероятность появления значений ниже x_{min} равной 0 (табл. 5).

Гипотезы, подтверждающие соответствие теоретических распределений цветности воды эмпирическим, проверены по критерию согласия Колмогорова (табл. 6).

Вычисления показали, что качество аппроксимации эмпирических распреде-

Таблица 2 / Table 2

Характеристики эмпирического и теоретического распределений цветности воды
Characteristics of the empirical and theoretical distributions of water color

Месяц Month	№	s_1	s^*	s_2	n_i	w_i	$F_n(s_2)$	$\hat{F}(s_2)$
Январь January	1	0,0	4,0	8,0	235	0,271	0,271	0,269
	2	8,0	12,0	16,0	353	0,408	0,679	0,674
	3	16,0	20,0	24,0	170	0,196	0,875	0,871
	4	24,0	28,0	32,0	71	0,082	0,957	0,965
	5	32,0	36,0	40,0	37	0,043	1,000	1,042
Май May	1	0,0	9,75	19,5	74	0,085	0,085	0,083
	2	19,5	29,25	39,0	285	0,329	0,415	0,435
	3	39,0	48,75	58,5	318	0,367	0,782	0,762
	4	58,5	68,25	78,0	152	0,176	0,957	0,974
	5	78,0	87,75	97,5	37	0,043	1,000	0,982
Июль July	1	0,0	5,0	10,0	145	0,167	0,167	0,164
	2	10,0	15,0	20,0	343	0,396	0,564	0,562
	3	20,0	25,0	30,0	226	0,261	0,824	0,796
	4	30,0	35,0	40,0	76	0,088	0,912	0,914
	5	40,0	45,0	50,0	68	0,079	0,991	0,964
	6	50,0	55,0	60,0	8	0,009	1,000	0,994
Октябрь October	1	0,0	4,0	8,0	121	0,139	0,139	0,137
	2	8,0	12,0	16,0	442	0,509	0,649	0,655
	3	16,0	20,0	24,0	239	0,275	0,924	0,909
	4	24,0	28,0	32,0	48	0,055	0,979	0,992
	5	32,0	36,0	40,0	15	0,017	0,997	0,995
	6	40,0	44,0	48,0	3	0,003	1,000	1,012

Примечание: № – номер интервала, s_1 – нижняя граница интервала, s^* – середина интервала, s_2 – верхняя граница интервала, n_i – частоты, w_i – относительные частоты, $F_n(s_2)$ – накопленная относительная частота, $\hat{F}(s_2)$ – значения функции распределения.

Note: № – interval number, s_1 – lower limit of the interval, s^* – middle of the interval, s_2 – upper limit of the interval, n_i – frequencies, w_i – relative frequencies, $F_n(s_2)$ – accumulated relative frequency, $\hat{F}(s_2)$ – distribution function values.

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты полиномов цветности воды и соответствующие им значения коэффициента детерминации / The coefficients of water color polynomials and their corresponding values of the coefficient of determination

Месяц Month	Коэффициенты полиномов / Polynomial coefficients $F_n(x) = a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$					Коэффициент детерминации R^2 Coefficient of determination R^2
	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0	
Январь / January	$2 \cdot 10^{-7}$	0,00005	-0,0037	0,1185	-0,4665	1,0000
Май / May	0	$-2 \cdot 10^{-6}$	0,0002	0,0117	-0,2067	0,9980
Июль / July	0	$8 \cdot 10^{-6}$	-0,0013	0,0732	-0,4457	0,9986
Октябрь / October	0	$3 \cdot 10^{-5}$	-0,0035	0,1353	-0,7366	0,9993

лений хорошее: во всех случаях значения коэффициентов детерминации R^2 выше 0,99 (табл. 3).

Вычислены функции распределения цветности воды для всех остальных месяцев и произведена оценка вероятности наступления событий, являющихся значимыми при принятии решений по оптимизации работы водозаборных сооружений (табл. 7).

Поскольку исторический максимум цветности воды в р. Уфе для января, февраля, марта, июля–декабря меньше 60 град, то появление больших значений принимается как практически невозможное событие.

Поскольку область определения теоретической функции ограничивается условием (1), аргумент x функции в июне будет ограничен отрезком:

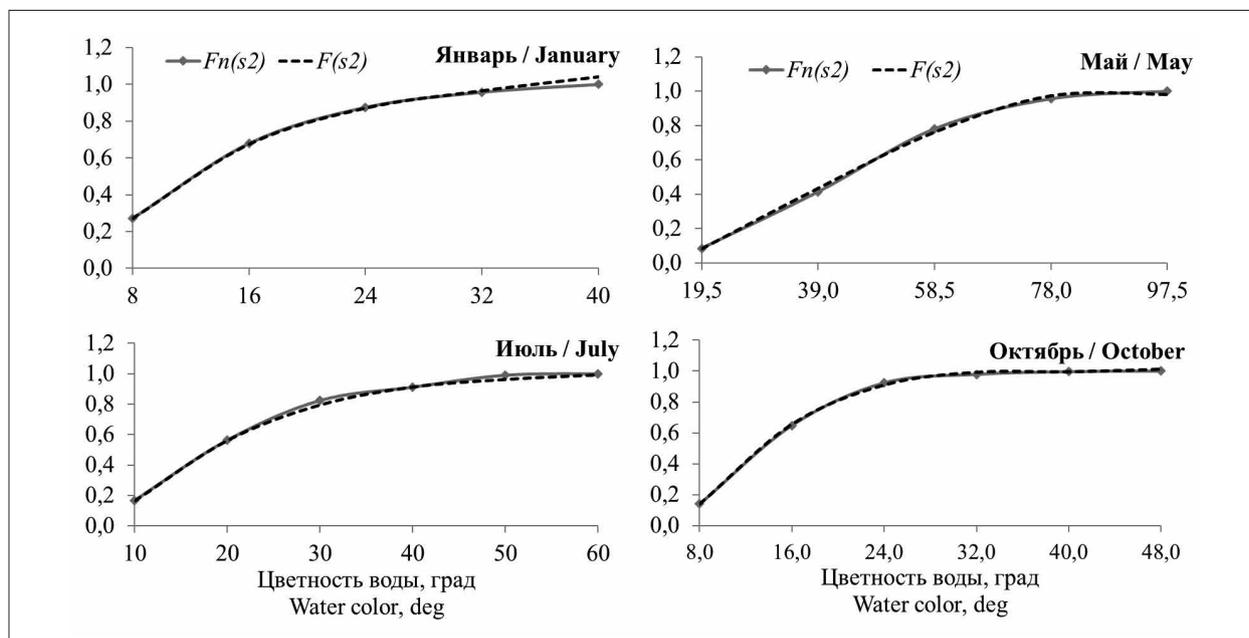


Рис. 4. Графики эмпирической $F_n(x)$ и теоретической $\hat{F}(x)$ функций распределения цветности воды
 Fig. 4. Graphs of empirical $F_n(x)$ and theoretical $\hat{F}(x)$ water color distribution functions

Таблица 4 / Table 4

Область допустимых значений аргумента x функций
 The area of acceptable values of the argument x of the functions

Месяц / Month	Значения аргумента / Values of the argument
Январь / January	$x \in [4,542;35,867] \subset [5,0;40,0] = [5,0;35,867]$
Май / May	$x \in [14,565;83,384] \subset [5,0;97,0] = [14,565;83,384]$
Июль / July	$x \in [6,898;61,478] \subset [5,0;56,0] = [6,898;56,0]$
Октябрь / October	$x \in [6,466;45,621] \subset [5,0;47,0] = [6,466;45,621]$

$$x \in [10,241;66,045] \subset [5,0;72,0] = [10,241;66,045] \quad (2)$$

Так как исторический минимум цветности воды для мая и июня составляет 5 град, а полиномы ограничены минимальными значениями 14,565 град (табл. 4) и 10,241 град (2) соответственно, то появление меньших значений принимается как невозможное событие (табл. 7).

Полученные функции распределения цветности по каждому месяцу помогают определить вероятности того, что значения показателя не превысят любой заданной величины, а также учитывают сезонные особенности формирования цветности воды в каждом из них.

Заключение

Сезонные колебания цветности воды в рамках одного года приводят к необходимо-

сти исследовать распределение показателя не за весь период, а для каждого месяца отдельно. Для этого предлагается аппроксимировать ряд накопленных относительных частот (эмпирическая функция распределения) некоторой непрерывной функцией (теоретическая функция распределения), обладающей всеми свойствами функции распределения.

Установлено, что рассматриваемые распределения цветности воды для января, мая, июля и октября достаточно точно описываются полиномами ($R^2 > 0,99$). Область допустимых значений аргумента x каждого из полиномов ограничивается отрезками, чтобы функция распределения случайной величины обладала свойствами функции распределения. По полученным теоретическим функциям распределения цветности определены вероятности превышения заданной величины. Например, вероятность того, что норматив по цветности не будет превышен в мае, равна 0,091, а в январе 0,792.

Таблица 5 / Table 5

Функции распределений цветности воды в реке для каждого месяца
Distribution functions of river water color for each month

Месяц / Month	Правило / Principle
Январь / January	$\hat{F}(x) = \begin{cases} 0; x < 5,0 \\ -2 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 + 0,00005 \cdot x^3 - 0,0037 \cdot x^2 + 0,1185 \cdot x - 0,4665; 5,0 \leq x \leq 35,867 \\ 1; x > 35,867 \end{cases}$
Май / May	$\hat{F}(x) = \begin{cases} 0; x < 14,565 \\ -2 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,0002 \cdot x^2 + 0,0117 \cdot x - 0,2067; 14,565 \leq x \leq 83,384 \\ 1; x > 83,384 \end{cases}$
Июль / July	$\hat{F}(x) = \begin{cases} 0; x < 6,898 \\ 8 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0013 \cdot x^2 + 0,0732 \cdot x - 0,4457; 6,898 \leq x \leq 56,0 \\ 1; x > 56,0 \end{cases}$
Октябрь / October	$\hat{F}(x) = \begin{cases} 0; x < 6,466 \\ 0,00003 \cdot x^3 - 0,0035 \cdot x^2 + 0,1353 \cdot x - 0,7366; 6,466 \leq x \leq 45,621 \\ 1; x > 45,621 \end{cases}$

Таблица 6 / Table 6

Проверка гипотезы о соответствии эмпирического и теоретического распределений цветности воды в реке по критерию Колмогорова / Verification of the hypothesis about the correspondence between the empirical and theoretical distributions of river water color according to the Kolmogorov–Smirnov test

Месяц / Month	D	λ	Вывод / Conclusion
Январь / January	0,042	1,22	Так как $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$, гипотеза принимается Since $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$, the hypothesis is accepted
Май / May	0,021	0,61	Так как $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$, гипотеза принимается Since $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$, the hypothesis is accepted
Июль / July	0,028	0,83	Так как $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$, гипотеза принимается Since $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$, the hypothesis is accepted
Октябрь / October	0,015	0,43	Так как $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$, гипотеза принимается Since $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$, the hypothesis is accepted

Примечание: D – мера расхождения между теоретическим и эмпирическим распределением, λ – критерий отклонения эмпирического распределения от теоретического, $^*\lambda_{0,05}=1,36$.

Note: D – measure of discrepancy between the theoretical and empirical distributions, λ – criterion for the deviation of the empirical distribution from the theoretical one, $^*\lambda_{0,05}=1.36$.

Методология позволила установить закономерности распределения цветности и достаточно точно оценить вероятности наступления любых событий (например, превышения показателем своего норматива). Найденные уравнения могут стать основой для повышения оперативности управления процессами очистки воды на водозаборе.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, публикационный номер FEUR-2023-0006, проект «Разработка и создание малотоннажных продуктов и реагентов (ингибиторы коррозии и солеотложения, антиоксиданты, биоциды, присадки и др.) для процессов нефтегазохимии и очистки водных

Таблица 7 / Table 7

Оценка вероятности превышения нормативов по цветности воды в реке
Estimation of the probability of exceeding the standards for water color in the river

Месяц Month	Вероятность того, что цветность не превысит половины норматива Probability that the color will not exceed half the standard	Вероятность того, что норматив не будет превышен Probability that the standard will not be exceeded	Вероятность превышения норматива не более, чем в 2 раза Probability of exceeding the standard by no more than 2 times	Вероятность превышения норматива в 3 и более раз Probability of exceeding the standard by 3 or more times
	Интервал значений цветности воды, град / Interval of water color values, deg			
	≤ 10	≤ 20	≥20, ≤ 40	≥60
Январь January	0,397	0,792	0,250	0
Февраль February	0,461	0,894	0,106	0
Март March	0,582	0,945	0,056	0
Апрель April	0,213	0,490	0,338	0,042
Май May	0	0,091	0,362	0,217
Июнь June	0	0,308	0,470	0,008
Июль July	0,164	0,562	0,352	0
Август August	0,246	0,724	0,276	0
Сентябрь September	0,240	0,800	0,200	0
Октябрь October	0,296	0,809	0,191	0
Ноябрь November	0,300	0,742	0,259	0
Декабрь December	0,362	0,700	0,281	0

Примечание: норматив цветности воды составляет 20 град согласно СанПиН 1.2.3685-21.
Note: the water color standard is 20 degrees according to the SanRaN 1.2.3685-21.

сред от загрязнений, замещающих импортные вещества и материалы. Теоретические и экспериментальные подходы».

References

1. Vozhdaeva M.Yu., Kholova A.R., Vagner E.V., Kantor E.A., Kantor L.I., Trukhanova N.V., Melnitsky I.A. The use of results of expanded monitoring research for the integrated assessment of drinking water according to indices of chemical harmlessness // *Gigiena i Sanitariya*. 2018. V. 97. No. 2. P. 117–124 (in Russian). doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-2-117-124

2. Yalaletdinova A.V., Enikeeva L.V., Vozhdaeva M.Yu., Kantor E.A. Statistical characteristics of the relationship between turbidity and water flow rate caused by releases of the water reservoir // *Theoretical and*

Applied Ecology. 2018. No. 1. P. 33–42 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-1-033-042

3. Dolgonosov B.M., Korchagin K.A. Statistical assessment of relationships between water flow in a river and water turbidity in water intakes // *Water Resour*. 2005. V. 32. P. 175–182. doi: 10.1007/s11268-005-0022-3

4. Dvinskikh S.A., Larchenko O.V., Oskina M.A. Developing a system of environmental indicators reflecting the water management aspects of an enterprise in the light of sustainable development // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 1. P. 140–147 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-140-147

5. Yu B., Wang Y., Zhou Q. Human health risk assessment based on toxicity characteristic leaching procedure and simple bioaccessibility extraction test of toxic metals in urban street dust of Tianjin, China // *PLoS ONE*. 2014. V. 9. No. 3. Article No. e92459. doi: 10.1371/journal.pone.0092459

6. Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // *Environ. Chem. Lett.* 2010. V. 8. No. 3. P. 199–216. doi: 10.1007/s10311-010-0297-8
7. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Technogenic impact of wastewater on the hydrochemical composition of the Angara River // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 90–95 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-090-095
8. Meyer T., Lei Y.D., Wania F. Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides during snowmelt within an urban watershed // *Water Res.* 2011. V. 45. No. 3. P. 1147–1156. doi: 10.1016/j.watres.2010.11.004
9. Vieira R., Fernandes J.N., Barbosa A.E. Evaluation of the impacts of road runoff in a Mediterranean reservoir in Portugal // *Environ. Monit. Assess.* 2013. V. 185. No. 9. P. 7659–7673. doi: 10.1007/s10661-013-3126-2
10. Eirikh A.N., Serykh T.G., Ovcharenko E.A., Podchufarova D.P., Kotovschikov A.V. Chemical composition of the surface water in the Ob River // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 96–102 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-096-102
11. Dzhamalov R.G., Nikanorov A.M., Reshetnyak O.S., Safronova T.I. The water of the Oka river basin: Chemical composition and sources of pollution // *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2017. No. 3. P. 114–132 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2017.21.3.114-132
12. Adamovich T.A., Skugoreva S.G., Tovstik E.V., Ashikhmina T.Ya. Study of the chemical composition of water bodies protected area for use as a regional background // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 89–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-089-096
13. Slipchenko A.V., Kul'skij L.A., Mackevich E.S. The current state of methods for the oxidation of water impurities and the prospects for chlorination // *Himiya i tekhnologiya vody*. 1990. V. 12. No. 4. P. 326–346 (in Russian).
14. Bigaliev A.B., Sintyurina A.V., Biyasheva Z.M. On the issue of the pathogenic effect of benzopyrene as an environmental pollutant (review) // *Vestnik KazNU. Seriya ekologicheskaya*. 2009. No. 1 (24). P. 14–21 (in Russian).
15. Karpukhin M.M., Ladonin D.V. Effect of soil components on the absorption of heavy metals under technogenic contamination // *Eurasian Soil Sc.* 2008. V. 41. P. 1228–1237. doi: 10.1134/S1064229308110124
16. Kusova I.V., Krasnogorskaya N.N. Physical and chemical processes in the technosphere. Ufa: UGATU, 2008. 234 p. (in Russian).
17. Markusheva T.V., Zhurenko E.Yu., Kusova I.V. Bacteria-degrading phenol and its chlorinated derivatives. Ufa: Gilem, 2002. 108 p. (in Russian).
18. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – a review // *Environ. Pollut.* 2019. V. 249. P. 200–207. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.020
19. Soromotin A.V., Kudryavtsev A.A., Efimova A.A., Gerter O.V., Fefilov N.N. The background content of heavy metals in the water of small rivers of the Nadym-Pur interfluve area // *Geoecologiya. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2019. No. 2. P. 48–55 (in Russian). doi: 10.31857/S0869-78092019248-55
20. Dryupina E.Yu., Eyrikh A.N., Eyrikh S.S., Papi-na T.S. Substantiation of methods of calculation of allowable discharge limits in setting up a water disposal system in big cities (as exemplified by the city of Barnaul) // *Ecology and Industry of Russia*. 2016. V. 20. No. 2. P. 48–54 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2016-2-48-54
21. Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. Current state of the Selenga River waters in the Russian territory concerning major components and trace elements // *Chemistry for Sustainable Development*. 2012. No. 20. P. 613–631 (in Russian).
22. Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Shinkareva G.L., Pashkina M.P., Romanchenko A.O., Promakhova E.V. Catchment based analysis of matter flows in the Selenga–Baikal system // *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5, Geografiya*. 2016. No. 3. P. 67–81 (in Russian).
23. Kuklin A.P., Tsybekmitova G.Ts. Content of toxic elements in water and macroalgae of the Argun River (Russia) basin water courses // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 1. P. 30–35 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-030-035
24. Harabrin A.V., Harabrin S.V., Kantor L.I., Kantor E.A., Klyavlin M.S. On the change in turbidity, color, permanganate oxidizability and pH of the water of the Ufa River // *Bashkirskij himicheskij zhurnal*. 2003. V. 10. No. 3. P. 80–81 (in Russian).
25. Kharabrin A.V., Kharabrin S.V., Kantor L.I., Kantor E.A., Klyavlin M.S. Comparison of water quality indicators of the Ufa River in terms of turbidity, color, oxidizability and pH in the sections of urban water intakes // *Bashkirskij himicheskij zhurnal*. 2003. V. 10. No. 3. P. 82–83 (in Russian).
26. Turikeshev G.T.-G. Brief sketch on physical geography of Ufa vicinities. Ufa: BGPU, 2000. 160 p. (in Russian).
27. Ismagilova R.S., Kuramshina N.G. Geoecological assessment of surface water pollution in the Republic of Bashkortostan // *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2021. No. 5-2. P. 19–23 (in Russian). doi: 10.24412/2500-1000-2021-5-2-19-23
28. Abdrakhmanov R.F. Hydrogeochemistry of urban areas of the Southern Urals // *Geokhimiya*. 2019. V. 64. No. 7. P. 733–741 (in Russian). doi: 10.31857/S0016-7525647733-741
29. Ajvazyan S.A., Mhitaryan V.S. Applied statistics and fundamentals of econometrics. Moskva: YuNITI, 1998. 1022 p. (in Russian).

30. Kremer N.Sh. Theory of probability and mathematical statistics. Moskva: YuNITI –DANA, 2009. 551 p. (in Russian).

31. Dolgonosov B.M. Vlasov D.Yu., Dyatlov D.V., Suracheva N.O., Grigoreva S.V., Korchagin K.A. Statistical characteristics of the variability of the quality of water entering the waterworks // Inzhenernaya ekologiya. 2004. No. 3. P. 2–20 (in Russian).

32. Shevchenko M.A. Physico-chemical substantiation of the processes of decolorization and deodorization of water. Kiev: Naukova dumka, 1973. 151 p. (in Russian).

33. Goronovsky I.T. Physical and chemical substantiation of automation of technological processes of water treatment. Kiev: Naukova dumka, 1975. 216 p. (in Russian).