

Методы оценки качества воды в технологии геоинформационных систем

Н. И. Куракина^{1✉}, И. Г. Белкин², Р. А. Мышко¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² DD Planet, Москва, Россия

✉ NKurakina@gmail.com

Аннотация. Проводится анализ различных методов оценки качества воды. Рассмотрен метод сравнения с предельно допустимой концентрацией загрязняющих веществ, индекс загрязнения воды, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды и комплексный показатель χ . На основе этих методов разработаны алгоритмы и реализованы инструменты-скрипты для получения оценок качества воды. Для сравнения результатов все оценки приводятся к единой шкале. Скрипты написаны на языке Python с возможностью сохранения, накопления и представления данных в среде ArcGIS for Desktop, позволившей создать набор инструментов с использованием пакета ArcPy. Инструменты протестированы на данных мониторинга качества воды, организованного Управлением Роспотребнадзора по Ленинградской области в период с 2008 по 2020 гг. По итогу тестирования произведено сравнение результатов работы инструментов и на их основе выявлены преимущества и недостатки методов оценки качества воды. Разработанные инструменты можно применять для общего и точечного анализа качества воды в различных регионах, учитывая или не учитывая совместное влияние вредных веществ, находящихся в воде и обладающих эффектом суммации.

Ключевые слова: качество воды, интегральная оценка, экологический мониторинг, инструменты-скрипты, ГИС

Для цитирования: Куракина Н. И., Белкин И. Г., Мышко Р. А. Методы оценки качества воды в технологии геоинформационных систем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 6. С. 35–46. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-35-46.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Methods of Water Quality Assessment in Geoinformation Systems Technology

N. I. Kurakina^{1✉}, I. G. Belkin², R. A. Myshko¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² DD Planet, Moscow, Russia

✉ NKurakina@gmail.com

Abstract. Various water quality assessing methods are analyzed. The method of comparison with the pollutants maximum permissible concentration, the water pollution index, the specific combinatorial water pollution index and the complex indicator χ are considered. Based on these methods, algorithms were developed and water quality assessments script-tools were implemented. To compare the results, all assessments were reduced to a single scale. The scripts were implemented using Python with the ability to save, accumulate and present data in the ArcGIS for Desktop environment, which make it possible to create a set of tools using the ArcPy package. The tools were tested on water quality monitoring data organized by the Office of Rosпотребнадзор in the Leningrad Oblast from 2008 to 2020. Based on the testing, the results of the tools were compared with identifying the advantages and disadvantages of the considered water quality assessment methods.

The developed tools can be used for general and local analysis of water quality in different regions, taking into account or not the combined summation effect of harmful substances in water.

Keywords: water quality, integral assessment, environmental monitoring, script-tools, GIS

For citation: Kurakina N. I., Belkin I. G., Myshko R. A. Methods of Water Quality Assessment in Geoinformation Systems Technology // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 6. P. 35–46. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-35-46.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Вода – один из наиболее важных компонентов жизнедеятельности человека. Мы потребляем воду каждый день в различных ее ипостасях. Качество воды имеет огромное влияние как на уровень жизни, так и на здоровье населения.

Каждый из методов оценки качества воды имеет свои преимущества и недостатки. Большинство из имеющихся методов не позволяет быстро и наглядно оценить качество воды, чтобы получить точную картину происходящего на исследуемой территории.

Чтобы решить данную проблему, был разработан набор инструментов для использования в геоинформационной системе. Данный набор инструментов реализует различные методы оценки качества воды, а также позволяет наглядно отображать полученные результаты на карте.

Методы оценки качества воды. Существует много различных методов оценки качества воды. Можно оценить вкус, цвет, запах, мутность – уже эти качества говорят о том, что вода требует очистки. Однако более точную оценку дают химический, гидробиологический анализ и применение комплексных показателей. Рассмотрим существующие методы оценки качества воды.

Метод сравнения с предельно допустимой концентрацией (ПДК). Основным критерием качества служит соответствие концентрации вредных веществ ПДК. Отсюда можно вынести самый первый и простой метод оценивания – сравнение с ПДК. Результаты оценки качества воды, собранные в пунктах контроля, сравниваются с установленными предельно допустимыми значениями. Эти значения включены в ГОСТы, обязательны для исполнения на всей территории Российской Федерации и регулярно контролируются государственной санитарно-эпидемиологической службой.

Значения ПДК определяются физическими, химическими и биологическими показателями качества воды на основе динамических наблюдений за природными условиями и состоянием здоровья населения. Также используются расчетные методы, результаты экспериментов и компьютерное моделирование [1], [2].

Индекс загрязнения воды (ИЗВ). Данный индекс входит в метод интегральной оценки [3], определяющей класс качества воды. ИЗВ рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{ИЗВ} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} / n,$$

где C_i – среднее значение определяемого показателя за период наблюдения; ПДК_i – предельно допустимая концентрация для данного параметра; n – количество исследуемых параметров.

Класс качества воды определяется по соответствию рассчитанного значения определенному диапазону (табл. 1).

Табл. 1. Классификация качества воды по ИЗВ
Tab. 1. WPI (water pollution index) water quality classification

ИЗВ	Класс качества воды	Оценка качества (характеристика) воды
Менее и равно 0.2	I	Очень чистые
Более 0.2...1	II	Чистые
Более 1...2	III	Умеренно загрязненные
Более 2...4	IV	Загрязненные
Более 4...6	V	Грязные
Более 6...10	VI	Очень грязные
Свыше 10	VII	Чрезвычайно грязные

Приведенный метод широко используется на практике, но имеет целый ряд недостатков:

- не учитывается взаимное влияние гидрохимических характеристик воды, изолированное воздействие отдельных химических веществ недостаточно для оценки фактической экологической ситуации;

- не все загрязняющие вещества входят в группу исследуемых показателей, а только шесть ингредиентов, имеющих наибольшие значения;

- некоторые химические компоненты в воде могут образовывать токсичные соединения даже при их малых концентрациях, что также не учитывается в данной методике.

Расчет ИЗВ осуществляется только по гидрохимическим показателям, в то время как микро-

биологические показатели часто имеют решающее значение при оценке пригодности воды для питьевого использования.

Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ). «Развитием» предыдущего метода можно назвать использование УКИЗВ. Этот метод также позволяет отнести итоговую оценку к определенному классу качества воды. Различают пять классов загрязненности воды по УКИЗВ:

- 1-й класс – условно чистая;
- 2-й класс – слабо загрязненная;
- 3-й класс – загрязненная;
- 4-й класс – грязная;
- 5-й класс – экстремально грязная.

Расчет проводится следующим образом: сначала по каждому ингредиенту рассчитывается обобщенный оценочный балл – он дает возможность одновременно учесть значения наблюдаемых концентраций и частоту обнаружения случаев превышения ПДК по каждому показателю. Значение обобщенного оценочного балла по каждому ингредиенту в отдельности может колебаться для различных вод от 1 до 16. Большему его значению соответствует более высокая степень загрязненности воды.

Если обобщенный оценочный балл по конкретному ингредиенту превышает 9, то такой показатель считается критическим. Если количество критических показателей достигает шести и более, вода без дальнейших расчетов относится к классу «экстремально грязная». В противном случае рассчитывается коэффициент запаса и определяется класс качества воды [4], [5].

Этот метод также учитывает только гидрохимические показатели качества воды.

Комплексный показатель χ . Данный показатель представляет собой интегральную оценку и позволяет учесть химические и бактериологические показатели качества воды. Комплексный показатель χ рассчитывается по формуле

$$\chi = \sqrt{\chi_{\text{хим}} \chi_{\text{бак}}}.$$

Сначала определяются частные показатели загрязненности воды $\chi_{\text{хим}}$ и $\chi_{\text{бак}}$. Они выражают кратность превышения нормативными значениями химических и бактериологических показателей и определяются по формулам

$$\chi_{\text{хим}} = \frac{\chi_{\text{ф. хим}}}{\chi_0_{\text{хим}}}, \quad \chi_{\text{бак}} = \frac{\chi_{\text{ф. бак}}}{\chi_0_{\text{бак}}},$$

где $\chi_{\text{ф. хим}}$ и $\chi_{\text{ф. бак}}$ – средние за рассматриваемый период (сезон, год и т. д.) фактические уровни химической и бактериологической загрязненности воды; $\chi_0_{\text{хим}}$ и $\chi_0_{\text{бак}}$ – нормативные значения химической и бактериологической загрязненности.

Средний за рассматриваемый период фактический уровень загрязненности воды химическими веществами рассчитывается по формуле

$$\chi_{\text{ф. хим}} = \left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{S_{ik}}{\text{ПДК}_i} \right)_j,$$

где S_{ik} – концентрация i -го вещества, относящегося к одной из пяти j -групп с одинаковыми лимитирующими признаками вредности (ЛПВ) в k -й пробе; ПДК_i – соответствующая i -му веществу предельно допустимая концентрация, определяемая в соответствии с категорией водопользования; j – число групп веществ с одинаковым ЛПВ, обнаруженных в воде исследуемой реки, $j = 1 \dots 5$; n – число веществ j -группы; m – число химических анализов воды за рассматриваемый период.

Нормативное значение химического показателя $\chi_0_{\text{хим}}$ определяется, исходя из верхнего предела

$$\text{соотношения } \sum_{i=1}^n \frac{S_{ik}}{\text{ПДК}_i} \leq 1. \text{ Тогда } \chi_0_{\text{хим}} = 1.$$

Уровень бактериальной загрязненности определяется по формуле

$$\chi_{\text{ф. бак}} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m C_k,$$

где C_k – коли-индекс k -й пробы; m – число бактериологических анализов воды за рассматриваемый период.

Чтобы определить нормативное значение бактериологического показателя $\chi_0_{\text{бак}}$, рекомендуется применять значения коли-индекса для воды рек, используемых в рекреационных целях:

$$\chi_0_{\text{бак}} = 1000.$$

Значение $\chi > 1$ свидетельствует о загрязненности воды сверх допустимых пределов [2].

Единая шкала оценок. Для того чтобы сравнить работу методов между собой, оценки каждого из методов необходимо привести к единой шкале. ИЗВ и УКИЗВ в результате дают балльную шкалу оценок. Для методов сравнения с ПДК и комплексного показателя χ пересчет осуществляется в соответствии с табл. 2.

Табл. 2. Шкала оценок
Tab. 2. Rate scale

Превышение ПДК/ $\chi_{\text{хим}}$	Оценка	Оценка в выводе инструмента	Оценка в баллах
$x \leq 0.5$ ПДК	Очень чистая	Very Pure	1
$0.5 \text{ ПДК} < x \leq 1 \text{ ПДК}$	Чистая	Pure	2
$1 \text{ ПДК} < x \leq 1.5 \text{ ПДК}$	Умеренно загрязненная	Moderately Polluted	3
$1.5 \text{ ПДК} < x \leq 2 \text{ ПДК}$	Загрязненная	Polluted	4
$2 \text{ ПДК} < x$	Очень загрязненная	Very Polluted	5

Здесь x – значение превышения ПДК (для метода сравнения) либо значение $\chi_{\text{хим}}$. Для сравнения оценок будут использоваться только химические показатели, это необходимо, чтобы исключить влияние параметров паразитического класса, которые не учитываются при расчете комплексного показателя χ .

Реализация методов оценки качества воды в виде набора инструментов. Для реализации геоинформационной системы оценки качества воды был выбран программный продукт ArcGis for Desktop, так как в нем возможно создание собственных инструментов из скриптов на языке Python с пакетом ArcPy [6], [7]. Также ArcGis позволяет собрать несколько таких скриптов в набор инструментов.

В качестве примера рассмотрим процесс создания инструмента для расчета удельного комбинаторного индекса загрязнения воды.

Блок-схема алгоритма определения УКИЗВ представлена на рис. 1.

Первый этап реализации – формирование таблицы со значениями повторяемости случаев превышения ПДК и средних значений кратности превышения ПДК, с количеством исследований, где концентрация вещества превышает ПДК. Для формирования этой таблицы в коде и дальнейшего ее использования с ArcPy она формируется в виде массива *numpy*.

Массив формируется в цикле по каждому значению в *WPDKArr*. Это цикл проходит по всем аббревиатурам параметров в таблице с предельно допустимыми концентрациями. В переменную *param_record* записывается массив из одного элемента с типом данных *nTableDt*, состоящих из 0 и аббревиатуры параметра. Далее *param_record* с помощью *numpy.append* присоединяется к общему массиву *params_np*. *numpy.append* – это функция библиотеки NumPy, которая присоединяет (добавляет) элементы к концу массива [8]. Также в этом блоке кода формируется словарь *betas*, где в качестве ключа выступает аббревиатура показателя, а значение – это массив отношений концен-

траций к ПДК, он понадобится для расчета параметра *beta*. Словарь в Python – это неупорядоченная коллекция, которая используется для хранения пар «ключ–значение». Словари могут содержать ключи и значения любого типа данных. Ключи должны быть уникальными, а значения могут повторяться. [9], [10]

Второй этап – расчет количества исследований по каждому показателю, расчет количества исследований с превышением ПДК, расчет отношений концентраций к ПДК.

Расчет осуществляется во вложенном цикле, первый цикл – по датам из *WaterconcArr*, второй – по параметрам из *WPDKArr*. Для облегчения читаемости кода в переменную *temp* записывается срез массива по дате. Далее, если значение концентрации больше либо равно нулю, увеличивается значение *n* показателя в массиве *params_np*, означающее количество исследований. Если концентрация вещества превышает ПДК, то в словаре *betas* в массив по ключу показателя добавляется отношение концентрации вещества к его ПДК.

На следующем этапе осуществляется расчет повторяемости случаев превышения ПДК, кратности превышения ПДК и частных оценочных баллов этих параметров.

Расчет осуществляется в цикле по всем элементам массива *params_np*. В переменные *n*, *n_* записываются с явным преобразованием к типу *float* значения количества исследований и количества исследований с превышением ПДК. Далее рассчитывается значение повторяемости случаев превышения ПДК. Результат записывается в переменную *alpha*, увеличивается значение переменной *N*, в которой хранится количество участвующих в исследовании показателей. Далее, если *n_* больше 0, то рассчитывается значение кратности превышения ПДК и записывается в переменную *beta*. Для расчета используется словарь *betas*. По ключу – аббревиатуре показателя – из него достается массив, собранный в предыдущих операциях, значения которого суммируются и делят-

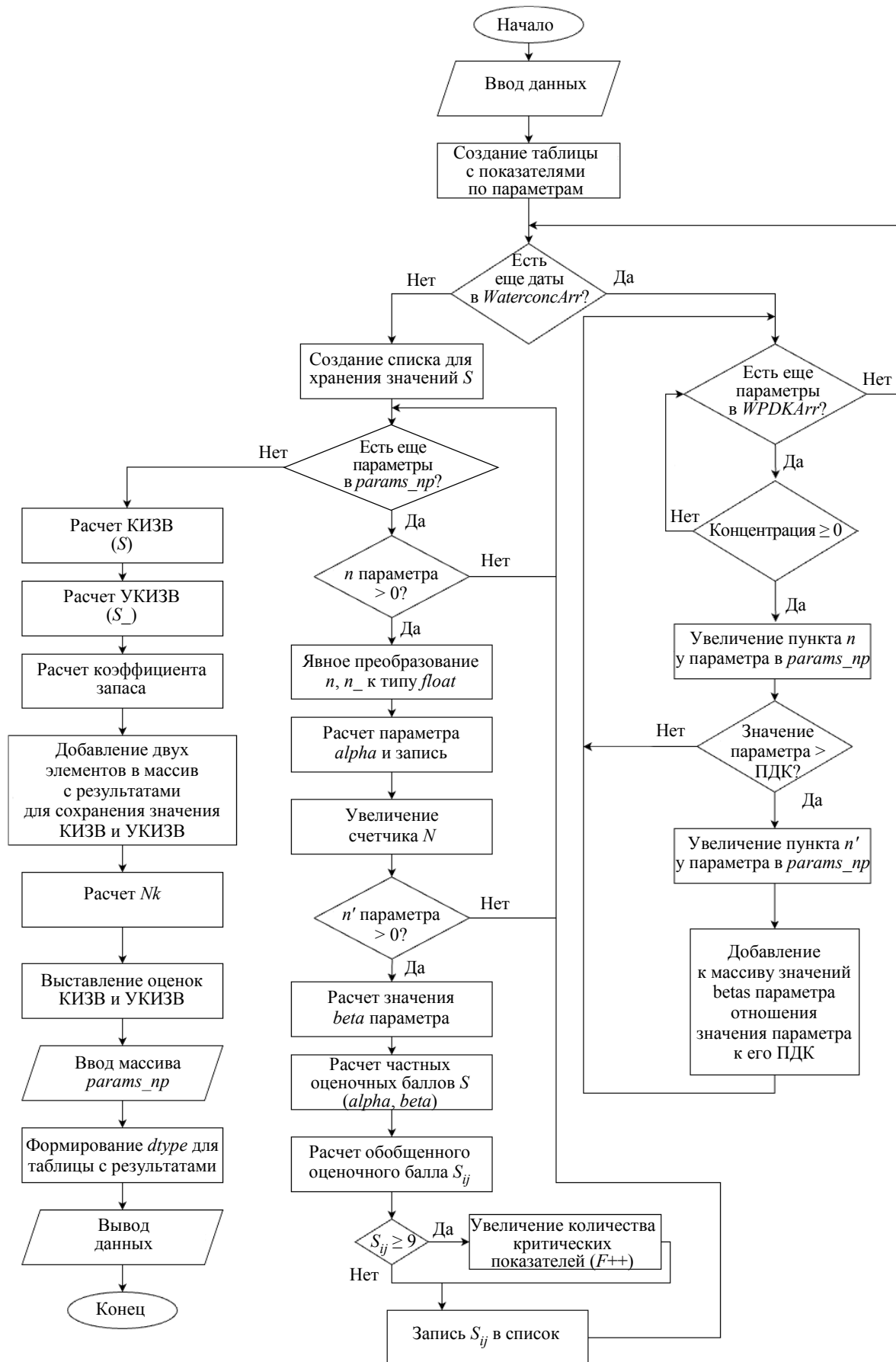


Рис. 1. Блок-схема инструмента расчета УКИЗВ
 Fig. 1. SCWPI (Specific combined water pollution index) calculation tool block-diagram

ся на значение $n_{\text{с}}$. Затем рассчитываются частные оценочные баллы S_{alpha} и S_{beta} показателя, для чего используются созданные функции *compute_alpha* и *compute_beta* [11].

После вычисления частных оценочных баллов S_{alpha} и S_{beta} вычисляется S_{ij} (переменная с обобщенным оценочным баллом) как произведение S_{alpha} и S_{beta} . Если значение S_{ij} будет больше 9 и F (число критических показателей загрязненности воды) будет меньше 5, то F увеличивается на единицу. Значение F необходимо для итоговой оценки. Полученное значение S_{ij} добавляется в список S_{list} .

Затем рассчитываются комбинаторный и удельный комбинаторный индексы загрязненности воды. Значение комбинаторного индекса записывается в переменную S как сумма всех элементов списка S_{list} , а значение удельного комбинаторного индекса записывается в переменную $S_{\text{с}}$ как отношение S к N (количество участвующих в расчете показателей).

На следующем этапе выставляются оценки в зависимости от полученных показателей.

В самом начале рассчитывается коэффициент запаса k [5]. После этого добавляются два дополнительных элемента к массиву *params_np* для того, чтобы значения S и $S_{\text{с}}$ можно было также

увидеть в итоговой результирующей таблице. Затем для уменьшения количества операций произведение N и k записывается в переменную Nk . Далее в блоках *if elif* в зависимости от того, в какой диапазон попало значение, выставляется оценка. Массив *params_np* конвертируется в таблицу по пути *SCIoWPTabel*. После этого формируется тип данных для результирующей таблицы и записывается в *result_dt*.

В результате получают инструмент, выдающий как итоговые, так и промежуточные результаты

Результаты оценки качества воды. Оценка проводилась по данным мониторинга качества воды, организованного Управлением Роспотребнадзора по Ленинградской области в период с 2008 по 2020 гг. [12].

Для сравнения работы инструментов были проведены расчеты удельного комбинаторного индекса загрязненности воды на посту 41203.1003 с 2008 по 2020 гг. Также на посту 41203.1003 были рассчитаны: индекс загрязнения воды, комплексный показатель χ и проведены сравнения с ПДК за 2008 г.

Результаты показаны на рис. 2 (мы показываем результаты работы инструментов, формирующих таблицы базы данных. На рис. 2–9 показаны скриншоты из ArcGIS).

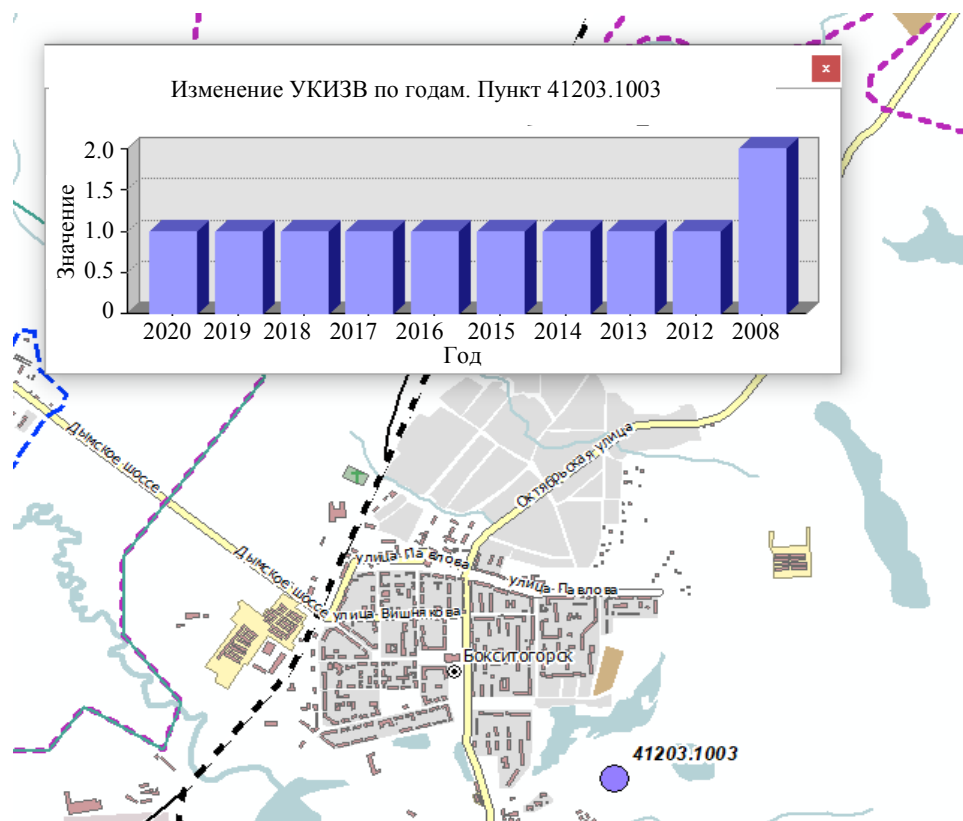


Рис. 2. Динамика по УКИЗВ на посту 41203.1003 за 2008–2020 гг.
Fig. 2. Dynamics of SCWPI on the post 41203.1003 by 2008–2020 years

Из рис. 2 видно, что вода имеет оценку «Pure», что означает чистая, кроме 2008 г., его оценка «Moderately Polluted» – умеренно загрязненная, что говорит о наличии превышений предельно допустимых концентраций. Рассмотрим результат 2008 г. более подробно, для этого инструмент возвращает таблицу базы данных с альфа, бета и их оценочными баллами по каждому показателю (рис. 3).

sciowp_41203_1003_2008							
OBJECTID *	Param	n_	n	alpha	beta	S_alpha	S_beta
1	pH_8_S	0	0	0	0	0	0
2	pH_9	0	4	0	0	0	0
3	Al	0	0	0	0	0	0
4	Amiak_N	0	3	0	0	0	0
5	Ba	0	0	0	0	0	0
6	Bor	0	0	0	0	0	0
7	Bpk5	0	0	0	0	0	0
8	Gamma_izomer	0	0	0	0	0	0
9	DDT	0	0	0	0	0	0
10	Fe	2	4	50	1.983333	4	1.983333
11	Zhestkost	0	4	0	0	0	0
12	Zapax	0	4	0	0	0	0
13	Cd	0	0	0	0	0	0
14	Mn	0	3	0	0	0	0
15	Mytnoct	0	4	0	0	0	0
16	Mytnoct_EMF	0	0	0	0	0	0
17	As	0	0	0	0	0	0
18	Nefpr	0	3	0	0	0	0
19	Ni	0	0	0	0	0	0
20	No3	0	1	0	0	0	0
21	No2	0	1	0	0	0	0
22	Cyx_oct	0	3	0	0	0	0
23	Ok_perm	2	4	50	1.4	4	1.4
24	PAB	0	3	0	0	0	0
25	Privkus	0	0	0	0	0	0
26	Pb	0	3	0	0	0	0
27	SO4	0	4	0	0	0	0
28	Tr_Cl_Met	0	0	0	0	0	0
29	Fe_ind	0	0	0	0	0	0
30	F	0	3	0	0	0	0
31	Cl_oct	0	0	0	0	0	0
32	Cl_oct_cv	0	0	0	0	0	0
33	Xlorid_Cl	0	4	0	0	0	0
34	Cr	0	0	0	0	0	0
35	Zvetnoct	2	4	50	1.4625	4	1.4625
36	Zn	0	3	0	0	0	0
37	result S	0	19	19.383333	0	0	0
38	result S_	0	0	1.020175	0	0	0

Рис. 3. Таблица баллов показателей при оценке УКИЗВ

Fig. 3. Table of indicator rates in the SCWPI assessment

Как видно из рис. 3, основная проблема качества заключается в показателях цветности, железе и перманганатной окисляемости. Каждый из этих показателей в 50 % случаев превышает ПДК: железо – практически в 2 раза, остальные – почти в 1.5 раза. В результате суммарное значение комбинаторного индекса загрязненности воды равно 19.38, т. е. больше, чем количество участвующих в исследовании показателей.

Теперь рассмотрим индекс загрязнения воды (рис. 4).

Значение индекса загрязнения воды (поле WPI) приблизительно равно 0.315, что соответствует значению «чистые», т. е. второе значение в таблице оценок ИЗВ (табл. 1).

OBJECTID *	Code	Data	WPI	Quality_mark
1	41203.1003	2008	0.315422	Pure

Рис. 4. Оценка индекса загрязнения воды

Fig. 4. Assessment of water pollution index

Рассмотрим значение комплексного показателя χ загрязненности воды химическими веществами (рис. 5).

Так как значение этого показателя учитывает группы ЛПВ, то оно служит более жесткой оценкой, так как берется максимум из групп ЛПВ. Результат оценки по этому показателю – умеренно загрязненная (Moderately Polluted).

Также были проведены исследования на близлежащих постах 41203.1005, 41203.1404. Рассчитаны удельный комбинаторный индекс загрязненности воды, индекс загрязнения воды, комплексный показатель χ и проведены сравнения с ПДК за 2008 г. (рис. 6–8).

Как видно из рис. 6, по УКИЗВ оценку, говорящую о загрязненности воды, получил только пост 41203.1003 результаты которого были описаны ранее.

Оценки по ИЗВ также говорят, что уровень загрязненности воды на этих трех постах не превышает норму.

Стоит отметить оценку загрязненности химическими веществами по показателю χ на посту 41203.1404 (рис. 8). Она говорит о сильной загрязненности воды химическими веществами. Для того чтобы понять, почему вода на этом участке сильно загрязнена, нужно обратиться к таблице сравнения ПДК на этом участке за 2008 г. (рис. 9).

В этой таблице выделены все вещества, относящиеся к 3-й группе ЛПВ. Как видно из рисунка, концентрации веществ не превышают ПДК, но показатель загрязненности воды химическими веществами учитывает совместное нахождение в пробе вредных веществ, относящихся к одной группе ЛПВ. В столбце *res_div_pdk* рассчитано отношение значения концентрации вещества к его ПДК. Чтобы рассчитать показатель, необходимо просуммировать эти отношения и поделить на количество химических анализов воды за период. В данном случае анализы проводились 22.01, 20.02, 18.03, 28.04, 16.05, 17.06, 18.07, 22.08, 10.09, 22.10, 19.11, т. е. всего 11 измерений.

chi_41203_1003						
OBJECTID *	Code	Data	Chi	ChiChem	ChiBact	Chem_level_mark
1	41203.1003	2008	1.117626	1.249087	1	Moderately Polluted

Рис. 5. Результаты расчета комплексного показателя χ (Chi)

Fig. 5. Results of calculation of the complex indicator χ (Chi)

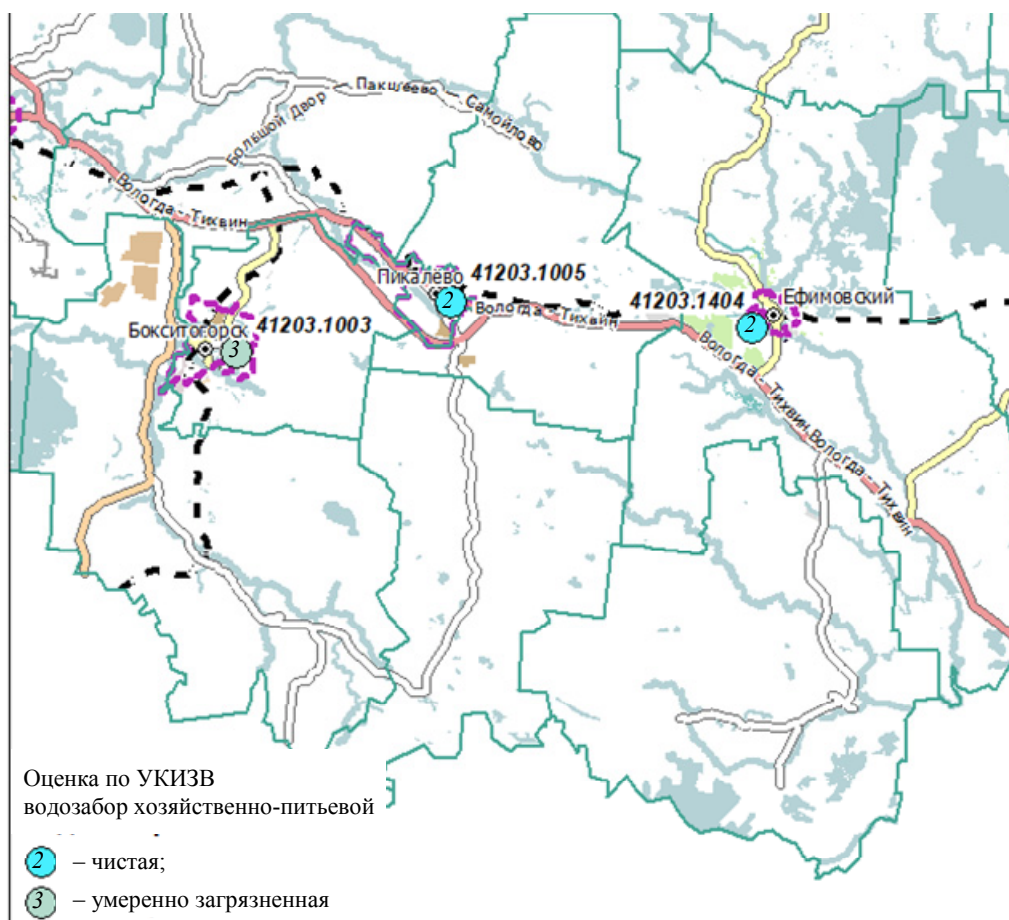


Рис. 6. Оценка по УКИЗВ
Fig. 6. Assessment by SCWPI

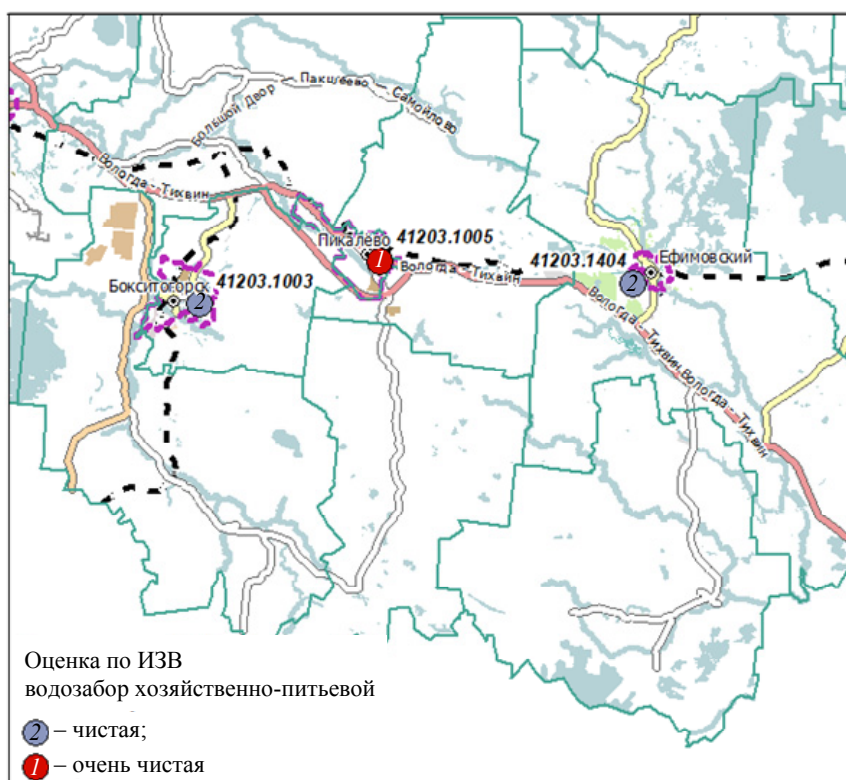


Рис. 7. Оценка по ИЗВ
Fig. 7. Assessment by WPI

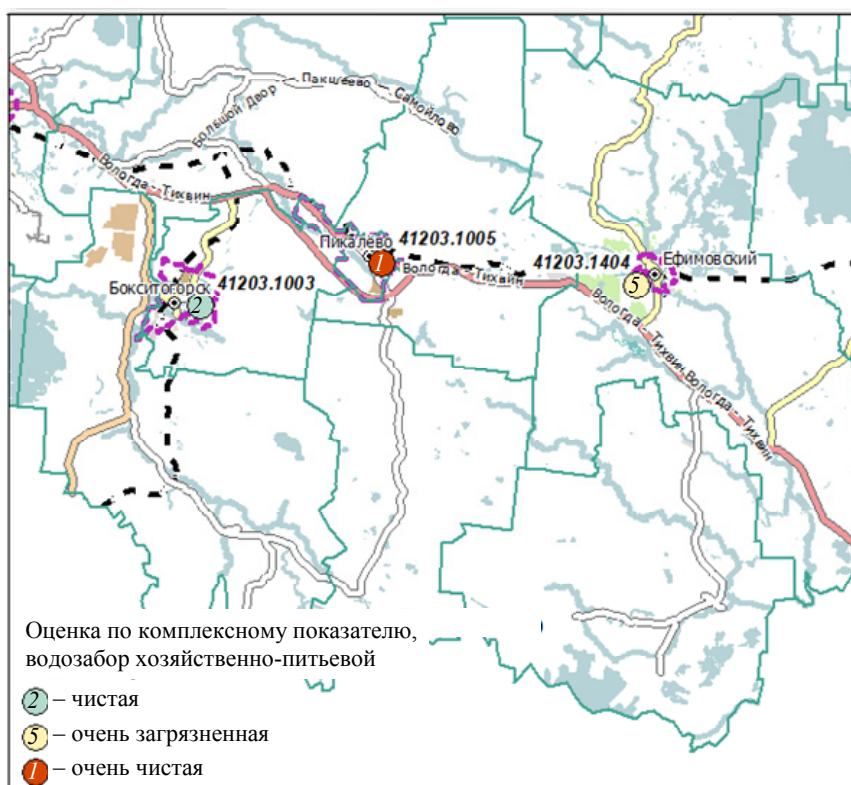


Рис. 8. Оценка по комплексному показателю χ
 Fig. 8. Assessment by complex indicator χ

levels_41203_1404_2008									
OBJECTID *	Code	Date	Mark	Diff	Result	PDK	Param	LPV	res_div_pdk
2	41203.1404	1/22/2008	Pure	-0.076	0.224	0.3	Fe	3	0.746667
10	41203.1404	1/22/2008	Pure	-0.228	0.272	0.5	Cl_oct	3	0.544
11	41203.1404	1/22/2008	Pure	-0.56	0.64	1.2	Cl_oct_cv	3	0.533333
15	41203.1404	2/20/2008	Pure	-0.1	0.2	0.3	Fe	3	0.666667
22	41203.1404	2/20/2008	Pure	-0.244	0.256	0.5	Cl_oct	3	0.512
23	41203.1404	2/20/2008	Pure	-0.56	0.64	1.2	Cl_oct_cv	3	0.533333
27	41203.1404	3/18/2008	Pure	-0.132	0.168	0.3	Fe	3	0.56
37	41203.1404	3/18/2008	Pure	-0.188	0.312	0.5	Cl_oct	3	0.624
38	41203.1404	3/18/2008	Pure	-0.528	0.672	1.2	Cl_oct_cv	3	0.56
42	41203.1404	4/28/2008	Pure	-0.036	0.264	0.3	Fe	3	0.88
52	41203.1404	4/28/2008	Pure	-0.244	0.256	0.5	Cl_oct	3	0.512
53	41203.1404	4/28/2008	Pure	-0.56	0.64	1.2	Cl_oct_cv	3	0.533333
56	41203.1404	5/16/2008	Very pure	-0.26	0.04	0.3	Fe	3	0.133333
64	41203.1404	5/16/2008	Pure	-0.228	0.272	0.5	Cl_oct	3	0.544
65	41203.1404	5/16/2008	Pure	-0.512	0.688	1.2	Cl_oct_cv	3	0.573333
68	41203.1404	6/17/2008	Pure	-0.124	0.176	0.3	Fe	3	0.586667
77	41203.1404	6/17/2008	Very pure	-0.26	0.24	0.5	Cl_oct	3	0.48
78	41203.1404	6/17/2008	Pure	-0.552	0.648	1.2	Cl_oct_cv	3	0.54
81	41203.1404	7/18/2008	Very pure	-0.172	0.128	0.3	Fe	3	0.426667
90	41203.1404	7/18/2008	Pure	-0.164	0.336	0.5	Cl_oct	3	0.672
91	41203.1404	7/18/2008	Pure	-0.504	0.696	1.2	Cl_oct_cv	3	0.58
94	41203.1404	8/22/2008	Pure	-0.14	0.16	0.3	Fe	3	0.533333
103	41203.1404	8/22/2008	Pure	-0.116	0.384	0.5	Cl_oct	3	0.768
104	41203.1404	8/22/2008	Pure	-0.472	0.728	1.2	Cl_oct_cv	3	0.606667
107	41203.1404	9/10/2008	Pure	-0.148	0.152	0.3	Fe	3	0.506667
116	41203.1404	9/10/2008	Pure	-0.244	0.256	0.5	Cl_oct	3	0.512
117	41203.1404	9/10/2008	Pure	-0.512	0.688	1.2	Cl_oct_cv	3	0.573333
120	41203.1404	10/22/2008	Pure	-0.124	0.176	0.3	Fe	3	0.586667
129	41203.1404	10/22/2008	Pure	-0.18	0.32	0.5	Cl_oct	3	0.64
130	41203.1404	10/22/2008	Pure	-0.472	0.728	1.2	Cl_oct_cv	3	0.606667
133	41203.1404	11/19/2008	Pure	-0.076	0.224	0.3	Fe	3	0.746667
142	41203.1404	11/19/2008	Pure	-0.212	0.288	0.5	Cl_oct	3	0.576
143	41203.1404	11/19/2008	Pure	-0.512	0.688	1.2	Cl_oct_cv	3	0.573333

Рис. 9. Результаты сравнения с ПДК по 3-й группе ЛПВ
 Fig. 9. The results of comparison MPC (maximal permissible concentration) by the 3rd group of LHI (limiting harmful index)

Сумма значений поля *res_div_pdk* равна приблизительно 18.971. Показатель загрязненности

воды химическими веществами определяется как $\chi_{\text{хим}} = 18.97/11 = 1.7$, что по приведенным в

табл. 2 оценкам соответствует загрязненным. Всего 11 измерений, по три вещества в каждом, относящихся к одной группе ЛПВ.

Есть небольшое отличие ручного расчета от результатов работы инструмента, так как в реализации инструмента оценка более жесткая, поэтому там значение балла выходит выше, и оценка получает значение «очень загрязненные».

Сравнение результатов оценки качества воды различными методами. Получив все вышеописанные результаты, можно сравнить работу методов по соответствию оценок. Результаты по посту 41203.1005 не представляют особого интереса, так как оценки всех методов там совпали на значении «чистые». Результаты других двух постов стоит сравнить, так как на них видны некоторые расхождения методов. Результаты с постов 41203.1003 и 41203.1404 сведены в табл. 3.

Табл. 3. Оценки качества воды за 2008 г.
Tab. 3. Water quality assessment on the by 2008 year

Метод	Оценка	Оценка в формате инструмента
<i>Пост 41203.1003</i>		
ИЗВ	Чистая	Pure
УКИЗВ / КИЗВ	Умеренно загрязненная	Moderately Polluted
Химическая оценка $\chi_{\text{хим}}$	Умеренно загрязненная	Moderately Polluted
<i>Пост 41203.1404</i>		
ИЗВ	Чистая	Pure
УКИЗВ/КИЗВ	Чистая	Pure
Химическая оценка $\chi_{\text{хим}}$	Очень загрязненная	Very Polluted

В случае поста 41203.1003 оценка ИЗВ по значению не вполне соответствует действительности, и другие методы здесь смотрятся лучше. Их оценки более точно описывают ситуацию, некоторые показатели за этот период значительно превышали ПДК.

В случае поста 41203.1404 оценки ИЗВ и УКИЗВ/КИЗВ совпали, но оценка χ по химиче-

ским показателям – «очень загрязненная». Несмотря на то, что все показатели не превышают свои ПДК, их совместное нахождение в воде превышает норму, отсюда и такая оценка. ИЗВ и УКИЗВ/КИЗВ не учитывают совместного влияния, и в данном случае это их серьезный недостаток, потому что фактическое состояние воды хуже, чем можно судить по оценкам с применением этих двух методов.

Заключение. В результате выполнения исследования были изучены разнообразные методы оценки качества воды. На их основе реализованы инструменты-скрипты для расчета индекса загрязнения воды, удельного комбинаторного индекса загрязненности воды, комплексного показателя χ и сравнения с ПДК.

Инструменты реализованы на языке Python с возможностью сохранения, накопления и представления данных в среде ArcGIS. Инструменты протестированы на разнообразных данных. По итогу этого тестирования было проведено сравнение результатов работы инструментов и на их основе выявлены некоторые преимущества и недостатки методов оценки качества воды.

Разработанные инструменты удобно применять для общего и точечного анализа качества воды, учитывая и не учитывая совместное влияние некоторых вредных веществ, находящихся в воде.

В качестве примера представлено использование ЦДЧ в составе информационной системы поддержки учебного процесса технических вузов при подготовке специалистов в области информационных технологий. Сформулированы частные задачи, которые необходимо решить при проектировании данной системы. Чтобы решить поставленные задачи, необходимо рассмотреть учебный процесс. В данной статье приводится модель, а именно полимодель учебного процесса, ключевым элементом которой служит компетентностная модель студента и преподавателя.

Список литературы

1. Смирнова Е. Э. Экологические стандарты управления качеством окружающей среды. СПбГАСУ. СПб., 2024. 537 с.
2. Кичигин В. И., Палагин Е. Д. Использование интегральных показателей загрязненности для анализа состояния водотоков // Водоснабжение и санитарная техника. 2005. № 7. С. 25–29.
3. Жанабергенова Д. Р., Снежкина О. В. Интегральная оценка качества воды // Молодой ученый. 2015. № 3(83). С. 336–338.
4. Сибгатуллина А. М., Мазуркин П. М. Определение экологического состояния речной воды по обобщенному показателю загрязненности // Водное хозяйство России. 2008. № 1. С. 37–46.
5. Фашевский Б. В. Основы экологической гидрологии. Минск: Экоинвест, 1996. 240 с.
6. Что такое ArcPy? / ArcGis Pro. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/analyze/arcpy/what-is-arcpy-.htm> (дата обращения: 23.04.2023).

7. ArcGIS Desktop Ресурсы для ArcMap / ArcGis for Desktop. URL: <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-desktop/resources> (дата обращения: 25.04.2022).

8. Numpy.append / numpy.org. URL: <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.append.html> (дата обращения: 11.03.2023).

9. NumPy, часть 1: начало работы / Pythonworld. URL: <https://pythonworld.ru/numpy/1.html> (дата обращения: 25.03.2023).

10. Словари (dict) и работа с ними. Методы словарей / Pythonworld.ru. URL: <https://pythonworld.ru/>

tipy-dannyx-v-python/slovari-dict-funkcii-i-metody-slova-rej.html (дата обращения: 16.03.2023).

11. Свид-во о рег. прогр. для ЭВМ № 2023664042 (RU). Оценка качества питьевой воды с использованием комплексных показателей / Н. И. Куракина, И. Г. Белкин. Заявл. 21.06.2023; опубл. 29.06.2023.

12. Куракина Н. И., Белкин И. Г. Технологии информационной поддержки контроля качества питьевого водоснабжения с использованием ГИС // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 2. С. 23–31.

Информация об авторах

Куракина Наталья Игоревна – канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий, директор УНЦ «ГИС технологии» СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: NKurakina@gmail.com

Белкин Иван Григорьевич – инженер-программист DD Planet, Дербеневская наб., 11, корп. А, БЦ «Полларс», офис А414, Москва, 115114, Россия.

E-mail: ivan.belkin52@gmail.com

Мышко Роман Андреевич – аспирант, ассистент кафедры информационно-измерительных систем и технологий СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: romanmyshko@gmail.com

References

1. Smirnova E. Je. Jekologicheskie standarty upravlenija kachestvom okruzhajushhej sredy. SPbGASU. SPb., 2024. 537 s. (In Russ.).

2. Kichigin V. I., Palagin E. D. Ispol'zovanie integral'nyh pokazatelej zagraznennosti dlja analiza sostojanija vodotokov // Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika. 2005. № 7. S. 25–29. (In Russ.).

3. Zhanabergenova D. R., Snezhkina O. V. Integral'naja ocenka kachestva vody // Molodoj uchenyj. 2015. № 3(83). S. 336–338. (In Russ.).

4. Sibagatullina A. M., Mazurkin P. M. Opredelenie jekologicheskogo sostojanija rečnoj vody po obobshhenomu pokazatelju zagraznennosti // Vodnoe hozjajstvo Rossii. 2008. № 1. S. 37–46. (In Russ.).

5. Fashhevskij B. V. Osnovy jekologicheskoy gidrologii. Minsk: Jekoinvest, 1996. 240 s. (In Russ.).

6. Chto takoe ArcPy? / ArcGis Pro. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/analyze/arcpy/what-is-arcpy-.htm> (data obrashhenija: 23.04.2023).

7. ArcGIS Desktop Resursy dlja ArcMap. / ArcGis for Desktop. URL: <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-desktop/resources> (data obrashhenija: 25.04.2022).

8. Numpy.append / numpy.org. URL: <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.append.html> (data obrashhenija: 11.03.2023).

9. NumPy, chast' 1: nachalo raboty / Pythonworld. URL: <https://pythonworld.ru/numpy/1.html> (data obrashhenija: 25.03.2023).

10. Словари (dict) i rabota s nimi. Metody slovarej / Python-world.ru. URL: <https://pythonworld.ru/tipy-dannyx-v-python/slovari-dict-funkcii-i-metody-slova-rej.html> (data obrashhenija: 16.03.2023).

11. Svid-vo o reg. progr. dlja JeVM № 2023664042 (RU). Ocenka kachestva pit'evoj vody s ispol'zovaniem kompleksnyh pokazatelej / N. I. Kurakina, I. G. Belkin. Zajavl. 21.06.2023; opubl. 29.06.2023. (In Russ.).

12. Kurakina N. I., Belkin I. G. Tehnologii informacionnoj podderzhki kontrolja kachestva pit'evogo vodosnabzhenija s ispol'zovaniem GIS // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2022. T. 15, № 2. S. 23–31. (In Russ.).

Information about the authors

Natalia I. Kurakina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Information Measuring System and Technologies, Director of the UNC «GIS Technologies», Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: NKurakina@gmail.com

Ivan G. Belkin – Software Engineer, DD Planet, Derbenevskaya nab., 11, build. A, Pollars Business Center, office A414, Moscow, 115114, Russia.

E-mail: ivan.belkin52@gmail.com

Roman A. Myshko – postgraduate student, assistant of the Department of Information Measuring System and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: romanmyshko@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24.02.2025; принята к публикации после рецензирования 26.04.2025; опубликована онлайн 30.06.2025.

Submitted 24.02.2025; accepted 26.04.2025; published online 30.06.2025.
