

УДК 556.5

## ДИНАМИКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ТРАНСГРАНИЧНОГО ЧУДСКОГО ОЗЕРА

Ю. А. Фетисова, Г. Т. Фрумин

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург*

Разработана методика оценки качества вод трансграничных водных объектов сопредельных государств, базирующаяся на расчете химического индекса и классификации качества воды. В методику включается измерение ряда химических параметров в пробах воды с последующим представлением полученной комбинации результатов в виде химического индекса  $CJ$ , который характеризует обобщенное качество воды. Для каждого параметра определяется его относительный вес  $W$ . Этот вес может рассматриваться как приоритетность каждого параметра. Затем для каждого параметра определяется значение подындкса  $q$  с помощью оцифрованных градуировочных графиков. Химический индекс загрязненности воды  $CJ$  является мультипликативной функцией подындксов  $q$  в степени, равной относительному весу каждого параметра  $W$ . Также разработана классификационная система оценки загрязненности трансграничных водных объектов на основе модели «разломанного стержня». Число классов качества вод принято равным пяти. На основе разработанной методики выявлена динамика качества вод трансграничного Чудского озера с 2000 по 2015 г. Установлено, что за этот период вода Чудского озера в целом по водоему характеризуется как слабозагрязненная (2-й класс качества). Химический индекс  $CJ$  варьировал от минимального значения 89,9 в 2003 г. до максимального 96,8 в 2013 г.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** оценка загрязненности воды; классификация качества воды; трансграничный водный объект; химический индекс; химические параметры.

### **Yu. A. Fetisova, G. T. Frumin. CHANGES IN THE WATER QUALITY OF THE TRANSBOUNDARY LAKE PEIPUS**

The aim of the study was to develop a technique for evaluation of transboundary water pollution. A method for evaluation of transboundary water quality was worked out. The method is based on calculation of the chemical index and classification of the water quality. It includes the measurement of several chemical parameters in water samples. The combination of the results is then represented as the chemical index  $CJ$ , which stands for the generalized water quality. A relative weight  $W$  is determined for each parameter. This weight can be considered as the priority level of each parameter. Then the value of the sub-index  $q$  is determined for each parameter with the help of digitized calibration graphs. The chemical index of water pollution  $CJ$  is the multiplicative function of sub-indices  $q$  in the degree equal to the relative weight of each parameter. Also, a classification system was produced for the pollution assessment of transboundary water bodies based on the 'broken stick' model. Water quantity was grouped into five classes. The suggested technique was applied to reveal changes in the water quality of the transboundary Lake Peipus from 2000 to 2015 year. The water in this period is generally classified as "low pol-

luted" (quality class 2). The chemical index *CJ* varied from the minimal 89.9 in 2003 to the maximal 96.8 in 2013.

**К e y w o r d s:** assessment of water pollution; classification of water quality; transboundary water body; chemical index; chemical parameters.

## Введение

Двадцать европейских стран получают более 10 %, а пять – около 75 % водных ресурсов из соседних стран, расположенных выше по течению трансграничных водотоков [Конвенция..., 1992]. Необходимость совместного использования трансграничных вод практически всегда приводит к возникновению определенной напряженности в обществах, которые они объединяют. Это обусловлено разнообразными факторами, которые, помимо отношений между странами, включают вопросы национальной безопасности, развития экономического потенциала, открытости и экологической стабильности. Управление трансграничными водными ресурсами (ТВР) может стать как объединяющим моментом, так и причиной конфликта. В мире за последние полвека в отношении ТВР имели место более 500 международных конфликтов и около 40 взаимных претензий на грани конфликтов с применением насилия.

В 1992 г. Россия присоединилась к Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, подписанной в том же году странами ЕС в Хельсинки. Международные конвенции и соглашения, регламентирующие взаимоотношения государств при совместном использовании водных объектов, охватывают широкий круг проблем, и одной из важнейших является проблема оценки качества водных ресурсов и степени их загрязненности [Рысбеков, 2009; Семенченко, Разлуцкий, 2011; Фрумин, Тимофеева, 2014].

Правовую основу использования водных ресурсов в Европе обеспечивает Рамочная директива по воде (РДВ) (2000/60/ЕС), принятая ЕС в 2000 г. Этот документ регламентирует политику охраны, использования и управления водными ресурсами и призван к 2015 г. гармонизировать и унифицировать подходы стран ЕС к управлению водными ресурсами и их охране. Природоохранной целью РДВ является достижение «хорошего статуса» всех грунтовых и поверхностных вод. РДВ содержит ряд общих требований по экологической защите поверхностных вод («хороший экологический статус») и общие минимальные требования по химическим параметрам («хороший химический статус»). К примеру, в Эстонии используют

следующие показатели: биологические, физико-химические и гидроморфологические. Общая оценка состояния водного объекта дается на основании самого худшего показателя. В Российской Федерации с 2002 г. степень загрязненности вод оценивается гидрохимическими показателями с использованием «удельного комбинаторного индекса загрязненности воды» (УКИЗВ) (РД 52.24.643–2002 «Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям»). Осложняет сотрудничество в сфере охраны трансграничных водных объектов отсутствие единых критериев оценки степени их загрязненности.

Чудское озеро (*Пейпси*; эст. *Peipsi*) – крупное пресноводное озеро, является северной составляющей Чудско-Псковского озера комплекса. Площадь зеркала озера составляет 2611 км<sup>2</sup> (73 % от озера комплекса), средняя глубина 8,3 м, наибольшая глубина 12,9 м, объем воды 21,79 км<sup>3</sup>. Соотношение эстонской и российской частей акватории 55/45 [Псковско-Чудское озеро..., 2012; Лесненко, 2012]. Северный и западный берега принадлежат Эстонской Республике, восточный – РФ. Посередине озера проходит граница России и Эстонии. Являясь одним из наиболее рыбопродуктивных озер Балтийского региона, Псковско-Чудское озеро играет существенную роль в экономике как Эстонии, так и северо-запада России, поэтому рациональное использование его биоресурсов и сохранение условий для их воспроизводства является приоритетной задачей обеих стран.

Цель проведенного исследования заключалась в разработке единой методики оценки загрязненности трансграничных вод сопредельных государств.

## Материалы и методы

Попытка оценить качество воды на основе химических критериев была сделана в Баварской службе использования вод. Этот метод основан на исследованиях, проведенных ранее в США и Шотландии [Кимстач, 1993]. Метод включает измерение ряда химических параметров в пробах воды (табл. 1) с последующим представлением полученной комбинации

Таблица 1. Параметры, используемые для расчета химического индекса, и их относительный вес

Параметр	Вес, W	Параметр	Вес, W
Растворенный кислород, % насыщения	0,20	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,10
БПК <sub>5</sub> , мгO <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	0,20	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,10
Температура воды, °C	0,08	pH	0,10
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,15	Электрическая проводимость, мкСм/см	0,07

Таблица 2. Аналитические зависимости между подындексами и гидрохимическими показателями

Параметр	Интервал варьирования	Формула
% насыщения O <sub>2</sub>	72–100	q = 1,14 × [%O <sub>2</sub> ] – 12,06
БПК <sub>5</sub> , мгO <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	0,7–2,8	q = –8,61 × [БПК <sub>5</sub> ] + 106,06
Температура воды, °C	15–28	q = 0,128t <sup>3</sup> – 8,456t <sup>2</sup> + 173,4t – 1036 при t < 15 °C q = 100
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0–0,9	q = –62,41 × [NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ] + 96,69
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0–32	q = –2,51 × [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] + 94,37
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,6–2,4	q = –8,18 × [PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ] + 101,4
pH	6,1–8,2	q = –25,32 × (pH) <sup>2</sup> + 365,5 × pH – 1219,6
Электрическая проводимость, l, мкСм/см	175–425	q = –0,1351 × l + 125,1

результатов в виде одного числа – химического индекса, который показывает обобщенное качество воды в данной пробе.

Химический индекс является мультипликативным и выражается в следующей форме:

$$CJ = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} = q_1^{w_1} \cdot q_2^{w_2} \dots q_n^{w_n}, \quad (1)$$

где CJ – химический индекс, безразмерная величина непрерывной шкалы от 0 до 100 (здесь 0 – худшее и 100 – лучшее качество воды); n – число параметров; q<sub>i</sub> – подындекс для i-го параметра (безразмерная величина между 0 и 100, являющаяся функцией от i-го параметра); W<sub>i</sub> – вес i-го параметра, число между 0 и 1, причем сумма весов равна 1, то есть

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1. \quad (2)$$

Химический индекс вычисляется следующим образом.

1. Для каждого параметра определяется его относительный вес (W) (табл. 1). Он может рассматриваться как приоритетность (важность) каждого параметра.

2. Для каждого параметра находится значение подындекса q, получаемое по аналитически определенному параметру в данной пробе с помощью оцифрованных градуировочных графиков (исходные неоцифрованные графики приведены на рис. 1). С использованием оцифрованных градуировочных графиков выявлены аналитические зависимости между q<sub>i</sub> и гидрохимическими показателями (табл. 2).

3. Рассчитываются значения CJ путем подстановки W и q в уравнение (1).

Исходные таблицы, по которым строились графики, в работе [Кимстач, 1993] отсутствуют. Поэтому была проведена их оцифровка.

В литературных источниках можно найти обширный материал о разработанных системах классификации пресноводных водоемов, имеющих разную степень «законодательной силы» и использующих различные комплексы гидрохимических и гидробиологических показателей. Существующий подход к квантованию и выделению граничных значений числовых признаков, используемых для группировки водных объектов по классам качества, чаще всего достаточно произволен и основывается на опыте исследователя. Традиционно выбирается некоторая шкала с числом градаций в пределах «магических» чисел от 3 до 7, например: «Очень чисто» – «Чисто» – «Не очень чисто» – «Не очень грязно» – «Грязно» – «Ну очень грязно» – «Катастрофически грязно». В дальнейшем, с использованием интуиции и квалификации разработчика, литературных данных, полученных «в начале прошлого века на одной английской реке», или общих соображений здравого смысла, каждой градации назначается конкретный диапазон значений из некоторого списка потенциально пригодных для этого показателей [Шитиков и др., 2003].

В дополнение к изложенному была разработана классификационная система оценки загрязненности трансграничных водных объектов на основе модели «разломанного стержня» [Мостеллер, 1971]. При этом было принято во внимание, что величина CJ варьирует от 0 до 100 (0 ≤ CJ ≤ 100). Количество классов качества вод было принято равным пяти (n = 5) (табл. 3).

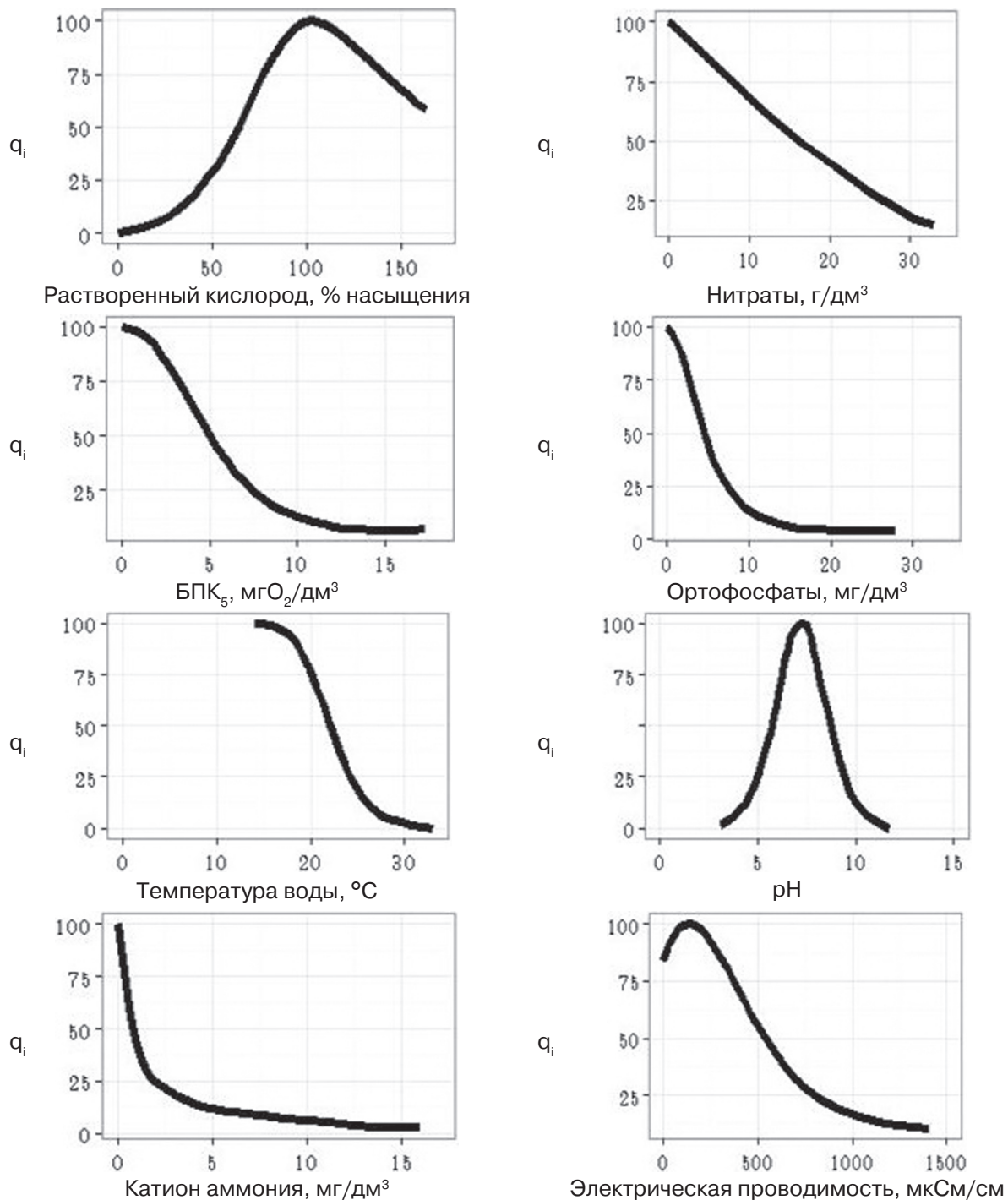


Рис. 1. Градуировочные кривые для определения химического индекса

### Результаты и обсуждение

Для оценки динамики качества воды трансграничного Чудского озера были использованы первичные данные гидрохимического мониторинга, проведенного Северо-Западным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РФ в период с 2000 по 2015 г. (табл. 4 и 5; рис. 2). При расчетах

использованы среднегодовые значения параметров (в целом по озеру).

На приведенном рисунке прямая линия – линия тренда. Коэффициент детерминации равен 0,15, что свидетельствует о практическом отсутствии тренда величин химического индекса ( $CJ$ ) за рассматриваемый период.

Математико-статистический анализ позволил выявить заметную тесноту связи между

Таблица 3. Классификация качества поверхностных вод

Характеристика состояния загрязненности воды	Значение <i>СJ</i>	Класс качества вод
Условно чистая	98–100	1
Слабозагрязненная	88–97	2
Загрязненная	73–87	3
Грязная	46–72	4
Экстремально грязная	0–45	5

Таблица 4. Среднегодовые значения химических показателей Чудского озера

Год	% насыщения O <sub>2</sub>	БПК <sub>5</sub> , мгO <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	t, °C	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	pH	Электрическая проводимость, мкСм/см
2000	96	2,0	15,3	0,08	0,1	0,02	8,2	261,0
2001	91	2,1	15,2	0,12	0,1	0,02	7,9	224,8
2002	95	1,8	14,6	0,04	0,1	0,02	8,4	234,3
2003	86	2,2	12,8	0,08	0,2	0,02	8,2	208,5
2004	91	1,6	12,9	0,06	0,6	0,01	8,3	239,3
2005	96	1,6	15,2	0,10	0,3	0,03	8,2	267,7
2006	98	1,4	13,3	0,05	0,2	0,02	8,6	265,2
2007	103	1,7	13,2	0,04	0,5	0,01	8,5	262,5
2008	103	1,4	11,0	0,07	0,5	0,01	8,4	267,3
2009	99	1,1	11,6	0,02	0,5	0,03	8,3	271,3
2010	96	2,4	14,5	0,02	0,7	0,03	8,1	259,6
2011	100	1,4	14,8	0,02	0,7	0,02	8,2	265,8
2012	101	1,5	11,9	0,08	0,6	0,02	7,9	254,0
2013	111	2,1	12,2	0,06	0,9	0,02	6,8	287,2
2014	92	1,8	13,7	0,22	0,3	0,02	8,0	286,9
2015	100	2,1	13,5	0,09	0,2	0,02	8,4	306,3

Таблица 5. Динамика качества воды Чудского озера

Год	<i>СJ</i>	Качество воды	Класс качества	УКИЗВ	Качество воды
2000	92,3	Слабозагрязненная	2	-	-
2001	91,9	Слабозагрязненная	2	-	-
2002	91,0	Слабозагрязненная	2	-	-
2003	89,9	Слабозагрязненная	2	-	-
2004	91,5	Слабозагрязненная	2	-	-
2005	92,5	Слабозагрязненная	2	2,58	Загрязненная
2006	90,3	Слабозагрязненная	2	3,00	Загрязненная
2007	92,1	Слабозагрязненная	2	2,57	Загрязненная
2008	93,3	Слабозагрязненная	2	2,25	Загрязненная
2009	94,0	Слабозагрязненная	2	2,44	Загрязненная
2010	92,1	Слабозагрязненная	2	3,03	Очень загрязненная
2011	94,2	Слабозагрязненная	2	1,86	Слабозагрязненная
2012	95,3	Слабозагрязненная	2	2,00	Загрязненная
2013	96,8	Слабозагрязненная	2	2,15	Загрязненная
2014	90,9	Слабозагрязненная	2	2,72	Очень загрязненная
2015	90,6	Слабозагрязненная	2	2,14	Загрязненная

*СJ* и УКИЗВ по шкале Чеддока (коэффициент корреляции  $r = 0,6$ ) [Макарова, Трофимец, 2002]. После отбраковки «выскакивающих значений» ( $СJ = 90$ ; УКИЗВ = 2,14 в 2015 г.) были выполнены условия, предъявляемые к уравнению линейной регрессии [Дружинин,

Сикан, 2001]. В результате выявлена статистически значимая зависимость между *СJ* и УКИЗВ с высокой теснотой связи ( $r = 0,8$ ) (рис. 3).

$$СJ = 103 - 4,02 * УКИЗВ. \quad (3)$$

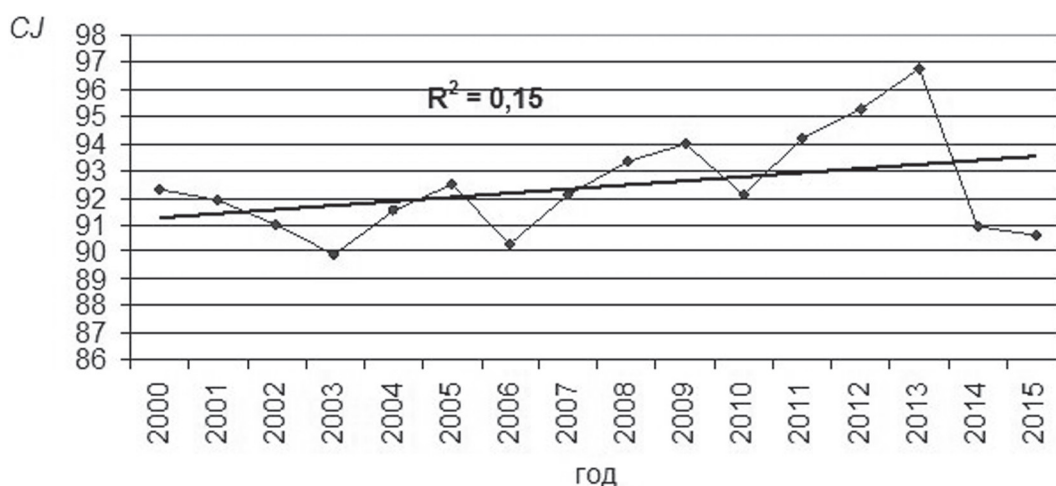


Рис. 2. Динамика качества воды трансграничного Чудского озера

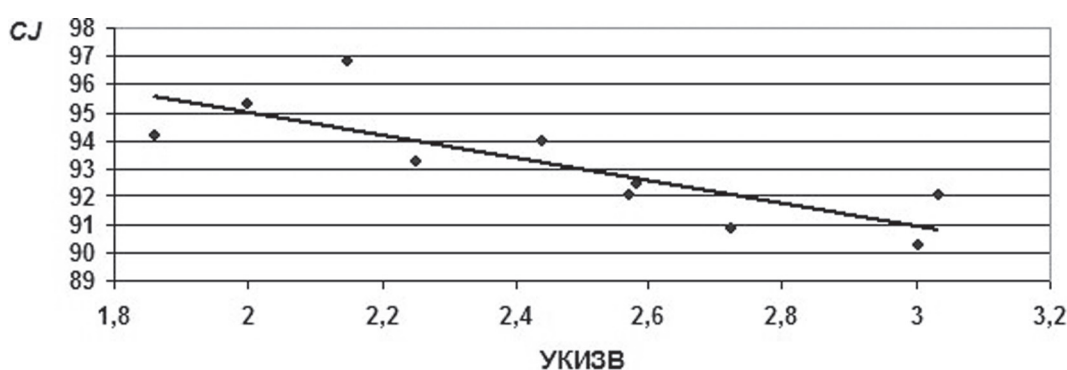


Рис. 3. Соотношение между химическими индексами (CJ) и удельными комбинаторными индексами загрязненности воды (УКИЗВ) в Чудском озере

## Выводы

1. За период с 2000 по 2015 г. вода Чудского озера характеризуется как «слабозагрязненная» (второй класс качества). За рассмотренный период химический индекс (CJ) варьировал от минимального значения в 2003 г. (89,9) до максимального в 2013 г. (96,8). Среднее значение CJ за весь рассматриваемый период – 92,4.

2. Выявлена статистически значимая зависимость между химическими индексами (CJ) и удельными комбинаторными индексами загрязненности воды (УКИЗВ) с высокой тесной связью (коэффициент корреляции  $r = 0,8$ ).

## Литература

Дружинин В. С., Сикан А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2001. 169 с.

Кимстач В. А. Классификация качества поверхностных вод в странах Европейского экономического сообщества. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 48 с.

Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер. Хельсинки. 17 марта 1992 г. ООН. 23 с.

Лесненко В. К. Природные ресурсы Псковской области, их рациональное использование. Псков: ПГПИ, 2012. 136 с.

Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

Мостеллер Ф. Пятьдесят занимательных вероятностных задач с решениями. М.: Наука, 1971. 104 с.

Псковско-Чудское озеро / Науч. ред. Т. Тимм, А. Раукас, Ю. Хаберман, А. Яани. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. 490 с.

Рысбеков Ю. Х. Трансграничное сотрудничество на международных реках: проблемы, опыт, уроки, прогнозы экспертов / Под ред. В. А. Духовного. Ташкент: НИЦ МКВК, 2009. 204 с.

Семенченко В. П., Разлуцкий В. И. Экологическое качество поверхностных вод. Минск: Белорусская наука, 2011. 329 с.

Фруммин Г. Т., Тимофеева Л. А. Трансграничные водные объекты и водосборы России: проблемы и пути решения // Биосфера. 2014. Т. 6, № 1. С. 174–189.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

Поступила в редакцию 11.01.2017

## References

*Druzhinin V. S., Sikan A. V.* Metody statisticheskoi obrabotki gidrometeorologicheskoi informatsii. Uchebnoe posobie [Methods of statistical processing of hydrometeorological information. Tutorial]. St. Petersburg: RGGMU, 2001. 169 p.

*Kimstach V. A.* Klassifikatsiya kachestva poverkhnostnykh vod v stranakh Evropeiskogo ekonomicheskogo soobshchestva [Classification of surface water quality in the countries of the European Economic Community]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993. 48 p.

*Konventsia* po okhrane i ispol'zovaniyu transgranichnykh vodotokov i mezhdunarodnykh ozer [The convention on the protection and use of transboundary water currents and international lakes]. Helsinki. March 17, 1992. OON. 23 p.

*Lesnenko V. K.* Prirodnye resursy Pskovskoi oblasti, ikh ratsional'noe ispol'zovanie [Natural resources of Pskov Oblast, their rational use]. Pskov: PGPI, 2012. 136 p.

*Makarova N. V., Trofimets V. Ya.* Statistika v Excel [Statistics in Excel]. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 368 p.

*Mosteller F.* Pyat'desyat zanimatel'nykh veroyatnostnykh zadach s resheniyami [Fifty entertaining

probabilistic tasks with decisions]. Moscow: Nauka, 1971. 104 p.

*Pskovsko-Chudskoe ozero* [Lake Peipsi]. Scient. eds Tarmo Timm, Anto Raukas, Yuta Khaberman, Ago Yaani. Tartu: Eesti Loodusfoto, 2012. 490 p.

*Rysbekov Yu. Kh.* Transgranichnoe sotrudnichestvo na mezhdunarodnykh rekakh: problemy, opyt, uroki, prognozy ekspertov [Transboundary cooperation on the international rivers: problems, experience, cases, forecasts of experts]. Ed. V. A. Dukhovnyi. Tashkent: NITS MKVK, 2009. 204 p.

*Semenchenko V. P., Razlutskiy V. I.* Ekologicheskoe kachestvo poverkhnostnykh vod [Ecological quality of surface waters]. Minsk: Belorusskaya nauka, 2011. 329 p.

*Frumin G. T., Timofeeva L. A.* Transgranichnye vodnye ob'ekty i vodosbory Rossii: problemy i puti resheniya [Transboundary water objects and catchments of Russia: problems and approaches to their solution]. *Biosfera* [Biosphere]. 2014. Vol. 6, no. 1. P. 174–189.

*Shitikov V. K., Rozenberg G. S., Zinchenko T. D.* Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii [Quantitative hydroecology: methods of system identification]. Tolyatti: IEVB RAN, 2003. 463 p.

*Received January 11, 2017*

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Фетисова Юлия Александровна**

аспирант кафедры экологии и биоресурсов  
Российский государственный гидрометеорологический университет  
Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург, Россия, 195196  
эл. почта: julika92@mail.ru  
тел.: +79111444723

### **Фрумин Григорий Тевелевич**

профессор кафедры экологии и биоресурсов, д. х. н.  
Российский государственный гидрометеорологический университет  
Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург, Россия, 195196  
эл. почта: gfrumin@mail.ru  
тел.: +79111274098

## CONTRIBUTORS:

### **Fetisova, Yulia**

Russian State Hydrometeorological University  
98 Maloohhtinsky Pr., 195196 St. Petersburg, Russia  
e-mail: julika92@mail.ru  
tel.: +79111444723

### **Frumin, Grigory**

Russian State Hydrometeorological University  
98 Maloohhtinsky Pr., 195196 St. Petersburg, Russia  
e-mail: gfrumin@mail.ru  
tel.: +79111274098