

В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

УДК 556.535.8:556.114

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ВОД ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Г.Т. Фрумин, Ю.А. Фетисова

Российский государственный гидрометеорологический университет, gfrumin@mail.ru

Разработана методика оценки качества трансграничных речных вод посредством расчета химического индекса и классификации качества воды. Методика основана на измерении ряда химических параметров в пробах воды с последующим представлением полученной комбинации результатов в виде химического индекса CJ, который характеризует обобщенное качество воды. Разработана классификационная система оценки загрязненности трансграничных водных объектов на основе модели «разломанного стержня».

Ключевые слова: трансграничные водные объекты, качество воды, химический индекс.

ALTERNATIVE APPROACH TO ESTIMATION OF QUALITY OF WATER OF TRANSBOUNDARY WATER OBJECTS

G.T. Frumin, Y.A. Fetisova

Russian State Hydrometeorological University

A methodology for assessing the quality of transboundary river waters has been developed through the calculation of the chemical index and the classification of water quality. The method is based on the measurement of a number of chemical parameters in water samples with subsequent presentation of the obtained combination of results in the form of the chemical index CJ, which characterizes the generalized water quality. A classification system for assessing the contamination of transboundary water bodies based on the «broken rod» model was developed.

Keywords: transboundary water body, water quality, chemical index.

Введение

Поверхностные воды представляют собой многокомпонентный природный объект переменного состава, который используется с различными целями, поэтому оценка качества поверхностных вод, особенно количественная, может вызывать затруднения. Актуальность этой проблемы определяется, в частности, тем, что от правильного выбора метода во многом зависит обоснованность выводов и прогнозов экологического состояния водных объектов.

В России анализом методов оценки качества поверхностных вод в разное время занималось значительное количество исследователей. Большое внимание решению проблемы оценки качества воды уделялось и в других странах, например в Польше, Венгрии, Германии, Чехословакии. В этих странах Европейского экономического сообщества оценки использовались, как правило, для различного рода классификации качества воды.

Несмотря на продолжительный период активных разработок в этой области (около 40 лет), большинство проблемных вопросов и в настоящее время находятся в стадии исследования. Существенно различается уровень их изученности, особенно степень теоретической разработки отдельных элементов процедуры оценивания [2].

Индексы качества воды, используемые в США, Великобритании, Испании, Канаде и ряде других стран, чаще всего имеют значения от 0 до 100, что указывает на стремление авторов обеспечить высокую чувствительность методов оценки. Нередко один и тот же метод обладает разной чувствительностью в водах, различающихся по степени загрязненности. Например, некоторые из них позволяют более адекватно оценивать очень грязные воды и менее чувствительны в диапазоне слабо загрязненных или загрязненных вод. Другие, наоборот, не улавливают различий в очень широком диапазоне грязных вод и значительно различающиеся состояния загрязненности вод оценивают одинаково [2].

Напряженность экологической ситуации во многих регионах мира и связанная с этим потребность в обеспечении специалистов и широкой общественности адекватной информацией об уровне загрязненности и состоянии водных объектов диктуют необходимость использования обобщающих показателей (ОП) качества воды. К настоящему времени предложены десятки ОП. Однако дальнейший прогресс сдерживается разнородностью исследований, нерациональным дублированием, трудностями в отношении обмена опытом [1, 3, 6, 8, 9].

Таким образом, анализ существующих оценок качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям свидетельствует о том, что комплексная характеристика качества поверхностных вод представляет собой достаточно сложную проблему, по которой пока не найдено однозначного решения.

Российская Федерация граничит с 14 государствами Европы и Азии. Государственную границу пересекает свыше 800 различных водных объектов, среди которых 70 больших и средних рек, большинство из которых являются жизненно важными как для России, так и для граничащих с ней государств. 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. Среди них одной из важнейших является проблема оценки качества водных ресурсов и степени их загрязненности [7, 10].

Отсутствие механизма, регулирующего взаимную ответственность государств за систематическое загрязнение трансграничных вод сверх экологически допустимых уровней, является весьма серьезной и нерешенной проблемой международных водных отношений и не способствует активизации работ по оздоровлению трансграничных водных объектов. Правовую основу использования водных ресурсов в Европе обеспечивает Рамочная директива по воде (РДВ) (2000/60/ЕС), принятая ЕС в 2000 г. Этот документ регламентирует подходы к политике охраны, использования и управления водными ресурсами и призван к 2015 г. гармонизировать и унифицировать подходы стран ЕС к управлению водными ресурсами

и их охране [8]. 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.

Цель проведенного исследования заключается в разработке единой для сопредельных государств методики оценки качества воды (на примере рек бассейна трансграничной реки Нарва).

Материалы и методы исследования

Попытка оценить качество речных вод на основе химических критериев была предпринята в Баварской службе использования вод. Этот метод основан на исследованиях, проведенных ранее в США и Шотландии [3]. Метод включает измерение ряда химических параметров в пробах воды (табл. 1) с последующим представлением полученной комбинации результатов в виде одного параметра (химического индекса, *CJ*), который характеризует обобщенное качество воды в данной пробе.

Таблица 1

Параметры, используемые для расчета химического индекса, и их относительный вес (*W*)

Параметр	<i>W</i>	Параметр	<i>W</i>
Растворенный кислород, % насыщения	0,20	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0,10
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	0,20	PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	0,10
Температура воды, °С	0,08	pH	0,10
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	0,15	Электрическая проводимость, мкСм/см	0,07

Химический индекс является мультипликативным и описывается следующей формулой:

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

где *CJ* — химический индекс, который представляет собой безразмерное значение непрерывной шкалы качества воды от 0 до 100 (0 — худшее и 100 — лучшее); *n* — число параметров; *q_i* — подындекс для *i*-го параметра (безразмерное значение между 0 и 100, являющееся функцией *i*-го параметра); *W_i* — вес *i*-го параметра: число между 0 и 1, причем сумма весов равна 1.

Химический индекс вычисляется следующим образом.

1. Для каждого параметра определяется его относительный вес (W) (см. табл. 1). Эти веса могут рассматриваться как приоритетность (важность) каждого параметра.

2. Для каждого параметра находится значение подындкса (q), получаемое по аналитически определенному параметру в данной пробе с помощью оцифрованных градуировочных графиков. С использованием оцифрованных градуировочных графиков были выявлены аналитические зависимости между q_i и параметрами (гидрохимическими показателями) (табл. 2).

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

Таблица 2

Аналитические зависимости между подындксами и гидрохимическими показателями

Параметр	Интервал	Формула
насыщения O_2 , %	72—100	$q = 1,14 \cdot [\%O_2] - 12,06$
БПК ₅ , мг O_2 /дм ³	0,7—2,8	$q = -8,61 \cdot [БПК_5] + 106,06$
Температура воды, °С	15—28	$q = 0,128t^3 - 8,456t^2 + 173,4t - 1036$ при $t < 15$ °С $q = 100$
NH_4^+ , мг/дм ³	0—0,9	$q = -62,41 \cdot [NH_4^+] + 96,69$
NO_3^- , мг/дм ³	0—32	$q = -2,51 \cdot [NO_3^-] + 94,37$
PO_4^{3-} , мг/дм ³	0,6—2,4	$q = -8,18 \cdot [PO_4^{3-}] + 101,4$
pH	6,1—8,2	$q = -25,32 \cdot (pH)^2 + 365,5 \cdot pH - 1219,6$
Электрическая проводимость λ , мксм/см	175—425	$q = -0,1351 \cdot \lambda + 125,1$

В дополнение к изложенному была разработана классификационная система оценки качества трансграничных водных объектов на основе модели «разломанного стержня» [5, 11]. При этом было принято во внимание, что величина CJ варьирует от 0 до 100 ($0 \leq CJ \leq 100$). Число классов качества вод было принято равным пяти ($n = 5$) (табл. 3).

Таблица 3

Классификация качества поверхностных вод

Характеристика состояния загрязненности воды	CJ	Класс
Условно чистая	98—100	1
Слабо загрязненная	88—97	2
Загрязненная	73—87	3
Грязная	46—72	4
Экстремально грязная	0—45	5

Для оценки динамики качества воды рек бассейна трансграничной реки Нарвы (табл. 4 и рис. 1) были использованы первичные данные гидрохимического мониторинга, проведенного Северо-Западным управлением по гидрометеорологии и

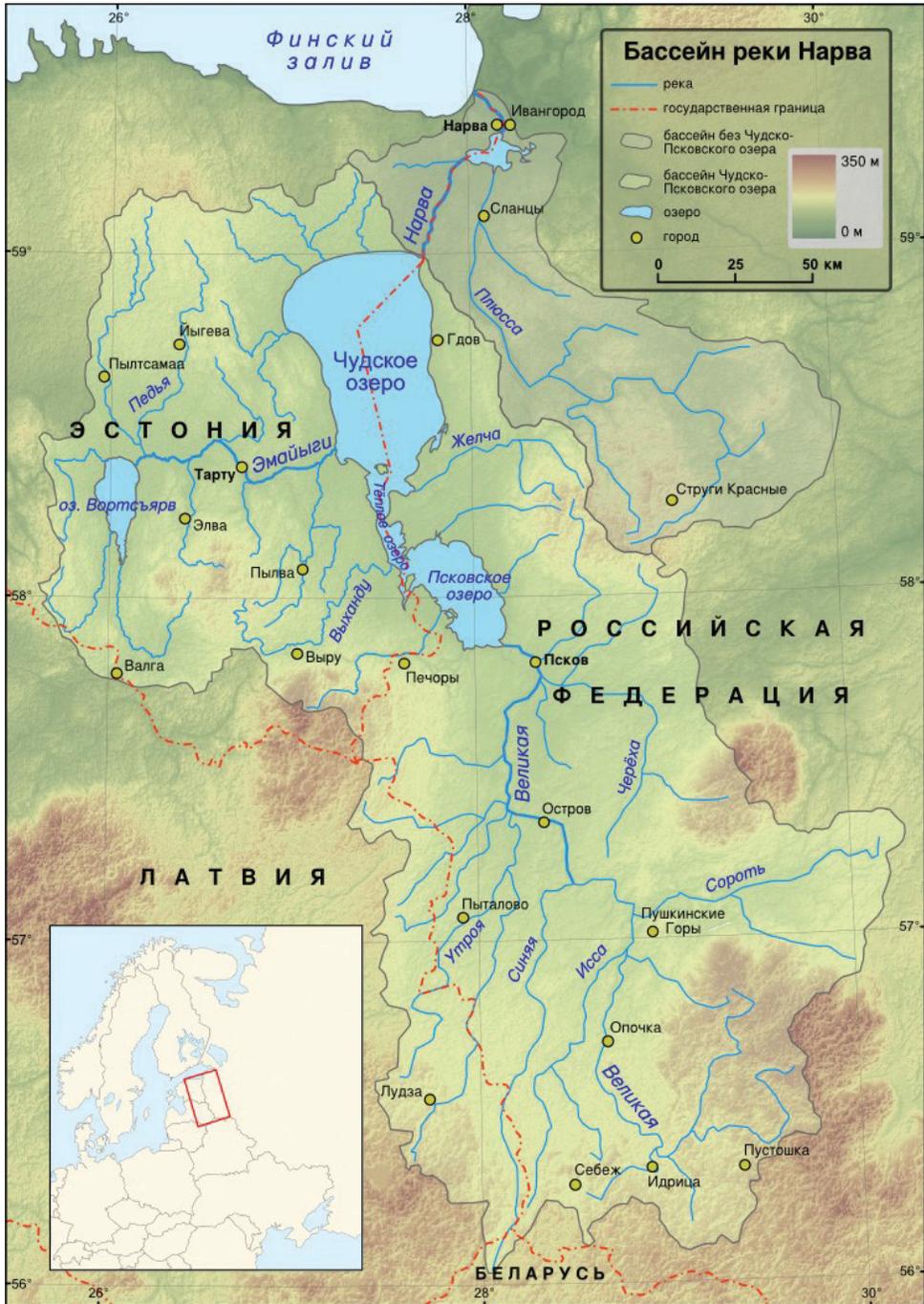


Рис. 1. Карта-схема бассейна реки Нарва.

мониторингу окружающей среды РФ и Министерством окружающей среды Эстонии в период с 2000 по 2015 г.

Таблица 4

Динамика качества воды рек бассейна трансграничной реки Нарвы

Страна	Площадь бассейна в стране, км ²	Доля бассейна в стране, %
Российская Федерация	36 100	64
Эстония	17 000	30
Латвия	3 100	6
Итого	56 200	100

Результаты и их обсуждение

Разработанный подход к комплексной оценке качества воды был применен для оценки межгодовой (рис. 2), межсезонной (табл. 5) и внутригодовой (табл. 6) динамики качества воды некоторых рек бассейна трансграничной реки Нарвы.

Линия тренда на рис. 2 свидетельствует об отсутствии тренда изменения качества воды реки Эмайыги (створ Кавасту) за рассмотренный период (с 2001 по 2015 г.). Как следует из данных, приведенных в табл. 5, вода реки Гдовки (створ г. Гдов) характеризуется как «грязная» в осенний период 2005 и 2015 гг. и в летний период 2006 г. Летом 2015 г. вода реки Гдовки характеризуется как «экстремально грязная».

По данным, приведенным в табл. 5, был проведен расчет средних сезонных значений химических индексов за период с 2004 по 2015 г. В результате были получены следующие значения: $CJ = 89,0$ (зимний сезон, вода «слабо загрязненная», 2-й класс качества); $CJ = 93,0$ (весенний сезон, вода «слабо загрязненная», 2-й класс качества); $CJ = 79,0$ (летний сезон, вода «загрязненная», 3-й класс качества); $CJ = 87,5$ (осенний сезон, вода «слабо загрязненная», 2-й класс качества).

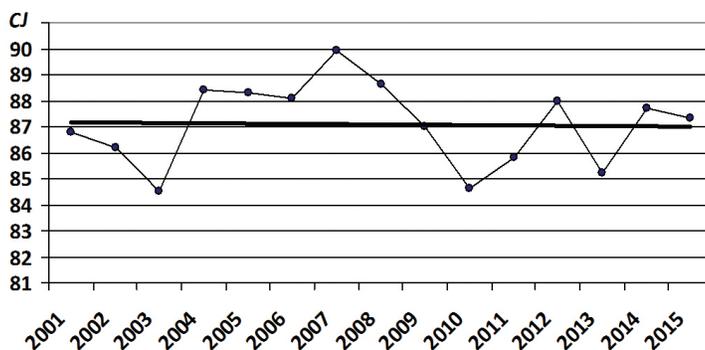


Рис. 2. Межгодовая динамика качества воды реки Эмайыги (створ Кавасту) (прямая линия — тренд).

Таблица 5

Межсезонная динамика качества воды реки Гдовки (створ г. Гдов)

Сезон	<i>CJ</i>	Характеристика состояния загрязненности воды	Класс качества
2004 г.			
Зима	86,7	Загрязненная	3
Весна	93,5	Слабо загрязненная	2
Лето	89,5	Слабо загрязненная	2
Осень	89,2	Слабо загрязненная	2
2005 г.			
Зима	86,8	Загрязненная	3
Весна	91,1	Слабо загрязненная	2
Лето	81,3	Загрязненная	3
Осень	68,3	Грязная	4
2006 г.			
Зима	80,0	Загрязненная	3
Весна	95,9	Слабо загрязненная	2
Лето	70,6	Грязная	4
Осень	95,0	Слабо загрязненная	2
2007 г.			
Зима	86,0	Загрязненная	3
Весна	90,8	Слабо загрязненная	2
Лето	77,8	Загрязненная	3
Осень	88,4	Слабо загрязненная	2
2008 г.			
Зима	97,4	Слабо загрязненная	2
Весна	91,1	Слабо загрязненная	2
Лето	92,9	Слабо загрязненная	2
Осень	89,8	Слабо загрязненная	2
2009 г.			
Зима	89,8	Слабо загрязненная	2
Весна	95,5	Слабо загрязненная	2
Лето	92,1	Слабо загрязненная	2
Осень	97,1	Слабо загрязненная	2
2010 г.			
Зима	93,5	Слабо загрязненная	2
Весна	90,2	Слабо загрязненная	2
Лето	75,4	Загрязненная	3
Осень	95,3	Слабо загрязненная	2
2011 г.			
Зима	97,9	Слабо загрязненная	2
Весна	94,4	Слабо загрязненная	2
Лето	86,3	Загрязненная	3
Осень	93,5	Слабо загрязненная	2

Окончение табл. 5

Сезон	<i>С_п</i>	Характеристика состояния загрязненности воды	Класс качества
2012 г.			
Зима	83,5	Загрязненная	3
Весна	96,1	Слабо загрязненная	2
Лето	81,9	Загрязненная	3
Осень	93,1	Слабо загрязненная	2
2013 г.			
Зима	93,2	Слабо загрязненная	2
Весна	94,3	Слабо загрязненная	2
Лето	87,4	Загрязненная	3
Осень	93,8	Слабо загрязненная	2
2014 г.			
Зима	94,2	Слабо загрязненная	2
Весна	96,4	Слабо загрязненная	2
Лето	79,0	Загрязненная	3
Осень	82,4	Загрязненная	3
2015 г.			
Зима	79,3	Загрязненная	3
Весна	86,6	Загрязненная	3
Лето	33,2	Экстремально грязная	5
Осень	63,6	Грязная	4

Таблица 6

Внутригодовая динамика качества воды реки Нарвы (створ Нарва) в 2015 г.

Месяц	<i>С_п</i>	Качество воды	Класс
Январь	89,3	Слабо загрязненная	2
Февраль	90,9	Слабо загрязненная	2
Март	97,2	Слабо загрязненная	2
Апрель	93,1	Слабо загрязненная	2
Май	94,1	Слабо загрязненная	2
Июнь	91,3	Слабо загрязненная	2
Июль	87,3	Загрязненная	3
Август	85,3	Загрязненная	3
Сентябрь	87,6	Загрязненная	3
Октябрь	89,1	Слабо загрязненная	2
Ноябрь	91,9	Слабо загрязненная	2
Декабрь	91,6	Слабо загрязненная	2

Как следует из данных, приведенных в табл. 6, в 2015 г. вода реки Нарвы (створ Нарва) характеризуется как «загрязненная» (3-й класс качества) в июле, августе и сентябре, а в остальные месяцы — как «слабо загрязненная» (2-й класс качества).

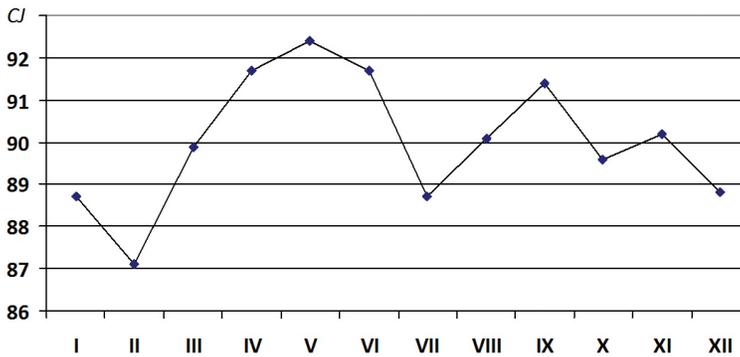


Рис. 3. Динамика внутригодового качества воды реки Нарвы (створ Нарва).
Усредненные данные за период 2000—2015 гг.

Кроме того, были проведены расчеты среднемесячных значений химического индекса за период с 2000 по 2015 г. (рис. 3). Было установлено, что минимальное значение $CJ = 87,1$ наблюдалось в феврале, а максимальное значение $CJ = 92,4$ — в мае. Среднее значение CJ за весь рассматриваемый период составило 90,0 (вода «слабо загрязненная», 2-й класс качества).

Усредненные за период 2004—2015 гг. значения химического индекса (CJ) были сопоставлены с расходом воды (R) в реке Нарве (створ Нарва). Выбор указанного периода осреднения обусловлен тем, что в доступной литературе отсутствуют данные о расходе воды до 2004 г. При анализе из рассмотрения были изъяты значения CJ и R за сентябрь как явно «выскакивающие».

На рис. 4 приведен график зависимости среднегодовых значений химических индексов от среднегодовых значений расхода воды реки Нарвы (створ Нарва) за период 2004—2015 гг. В результате расчетов для указанного набора значений CJ и R было получено следующее уравнение регрессии [4]:

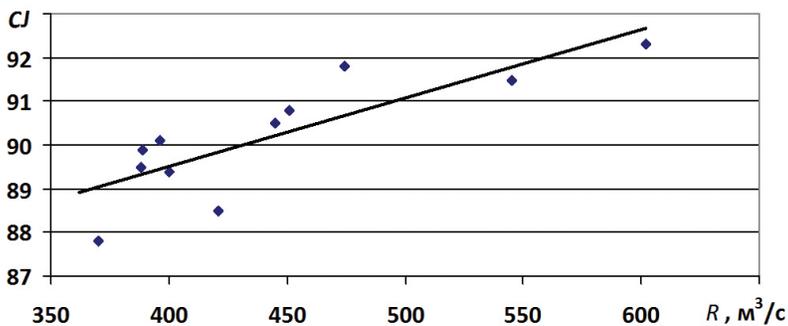


Рис. 4. Зависимость среднегодовых значений химического индекса (CJ) от среднегодового расхода воды реки Нарвы (створ Нарва) R .

$$CJ = 83,2 + 0,016R. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации данного уравнения описывает 69 % дисперсии исходных данных CJ , стандартная ошибка модели составляет $\sigma_{Y(X)} = 0,81$, причем модель значима (адекватна) по критерию Фишера ($F_p = 19,8$) для любого уровня значимости. Несмотря на малый объем исходной выборки, уравнение (2) удовлетворительно описывает зависимость химического индекса от расхода воды реки Нарвы.

Выводы

1. Разработан альтернативный комплексный гидрохимический подход к оценке качества воды трансграничных водотоков.
2. Предложенный подход может быть применен в гидрохимической практике при мониторинге трансграничных водотоков поверхностных вод суши.

Список литературы

1. *Евдокимов С.А.* Обобщающие показатели качества поверхностных вод // Водные ресурсы. 1999. № 2. С. 109—114.
2. *Зубарев В.А.* Гидрохимические индексы качества поверхностных вод // Региональные проблемы. 2014. Т. 17, № 2. С. 71—77.
3. *Кимстач В.А.* Классификация качества поверхностных вод в странах Европейского экономического сообщества. СПб: Гидрометеиздат, 1993. 48 с.
4. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб: изд-во РГГМУ, 2008. 407 с.
5. *Мостеллер Ф.* Пятьдесят занимательных вероятностных задач с решениями. М.: Наука, 1971. 104 с.
6. *Никаноров А.М.* Научные основы мониторинга качества вод. СПб: Гидрометеиздат, 2005. 576 с.
7. *Рысбеков Ю.Х.* Трансграничное сотрудничество на международных реках: проблемы, опыт, уроки, прогнозы экспертов / Под ред. В.А. Духовного. Ташкент: изд-во НИЦ МКВК, 2009. 204 с.
8. *Семенченко В.П., Разлуцкий В.И.* Экологическое качество поверхностных вод. Минск: Белорусская наука, 2011. 329 с.
9. *Тимофеева Л.А., Фруммин Г.Т.* Проблемы нормирования качества поверхностных вод // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 38. С. 215—229.
10. *Фруммин Г.Т., Тимофеева Л.А.* Трансграничные водные объекты и водосборы России: проблемы и пути решения // Биосфера. 2014. Т. 6, № 1. С. 174—189.
11. *Фруммин Г.Т., Фетисова Ю.А.* Трансграничные водные объекты. Проблема оценки качества воды / В кн.: Материалы V Международной научно-практической конференции, 27—28 октября 2016 г. СПб: изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. 2016. С. 569—571.