

родной научно-практической конференции, приуроченной к 1000-летию города Бреста «Актуальные проблемы наук о Земле исследования трансграничных регионов» в двух частях. Часть 2. – Брест: ,2019 года. С. 6–10.

3. Волчек, А.А. Моделирование гидрохимических показателей качества реки Мухавец // А.А. Волчек М.А. Таратенкова / Сборник материалов региональной научно-практической конференции, приуроченной к 50-летию кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов «Перспективные методы очистки природных и сточных вод». – Брест: БрГТУ, 2019. С. 18-23.

4. Ресурсы поверхностных вод СССР. Описание рек и озер и расчеты основных характеристик их режима. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – Т.5 : Белоруссия и Верхнее Поднепренье / под ред. К.А. Клюевой. – 1107 с.

УДК 556.182

ОСОБЕННОСТИ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ВОДООХРАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РЕГИОНАХ

А. А. Волчек¹, П. В. Шведовский², Л. В. Образцов³, Л. Г. Срывкина⁴

¹ Доктор географических наук, профессор, профессор кафедры природообустройства факультета инженерных систем и экологии УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : volchak@tut.by

² К. т. н., профессор, профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : ofig@bstu.by

³ К. т. н., доцент, доцент кафедры экономики и организации строительства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : leonwladobr1@gmail.com

⁴ Старший преподаватель кафедры экономики и организации строительства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: lgsryvkina@mail.ru

Реферат

Рассмотрена методология построения математических моделей по выбору оптимальной стратегии водоохранной деятельности в регионах и для водопотребителей. При этом водная среда рассматривается как единое целое со всеми техническими, экологическими, экономическими и другими, связанными с ней, проблемами.

Особое внимание уделено увязке и оптимизации инвестиций на водоохраные мероприятия с максимизацией темпов роста экономики регионов при заданной динамике загрязнений водной среды при планируемых темпах роста экономики.

Приведен также анализ математических моделей оптимальной стратегии водоохранной деятельности и на уровне предупреждений – водопотребителей.

Ключевые слова: моделирование, стратегия, регион, водная среда, водохозяйственная деятельность, речной бассейн, водопотребители.

OPTIMAL STRATEGY FOR WATER PROTECTION ACTIVITY IN REGIONS

A. A. Volchak, P. V. Shvedovsky, L. V. Obrazcov, L. G. Sryvkina

Abstract

The methodology for constructing mathematical models to select the optimal strategy for water protection activity in the regions and for water consumers is considered. At the same time, the water environment is considered as a whole with all technical, environmental, economic and other problems associated with it.

Particular attention is paid to linking and optimizing investments in water protection measures with maximizing the growth rates of the regional economy in the conditions of a given dynamics of water pollution at the planned growth rates of the economy.

An analysis of mathematical models of the optimal strategy for water protection activities at the level of water consumer warnings is also given.

Key words: modeling, strategy, region, water environment, water management activities, river basin, water consumers.

Введение

Сегодня проблема оптимального водопользования стала актуальной как никогда ранее.

Новая экономическая политика и современные требования по экологизации производств и технологий требуют не столько сохранения водных ресурсов в состоянии, близком к сложившемуся, сколько восстановления их естественного потенциала.

Современные изменения скорости протекания большинства природных и техногенных процессов привели к нарушению биологического, геохимического, генетического, ресурсно-сырьевого и многих других видов природного равновесия и неопределенности состояния водной среды, стратегии и тактики взаимодействия населения, производства, экономики и природы [1, 2, 3].

Возрастающие в геометрической прогрессии масштабы антропогенного воздействия на водную среду, его отрицательные последствия и необходимость оптимизации этого воздействия требуют активного поиска путей решения сложившихся проблем.

Обоснование структуры моделей водоохранной деятельности

Распространенные сегодня модели экономического развития водных регионов обычно априорно предполагают неограниченность природных ресурсов либо не учитывают возможные потери, связанные с нарушением естественных процессов в природной среде, и затраты на предотвращение этих нарушений через комплекс водоохранных мероприятий.

Для понимания пределов возможностей разрабатываемых моделей необходимо отметить, что включение в них экономических характеристик сказывается на качестве информационного обеспечения, поскольку подобные показатели, входя в целевые функции и ограничения большинства задач оптимизации, оказываются заведомо наиболее неточной и неопределенной информацией, даже на фоне недостаточности или неадекватности других данных.

Уникальность водных систем практически исключает возможность активного эксперимента, поэтому важное значение для прогнозирования и оценки состояния водных ресурсов приобретает построение и использование соответствующих математических моделей.

В зависимости от пространственного и временного масштабов антропогенных воздействий модели могут иметь локальный, региональный или глобальный характер.

Базовый вариант структуры моделей для выбора стратегий водоохранной деятельности в речном бассейне (регионе) приведен на рис. 1 [4].

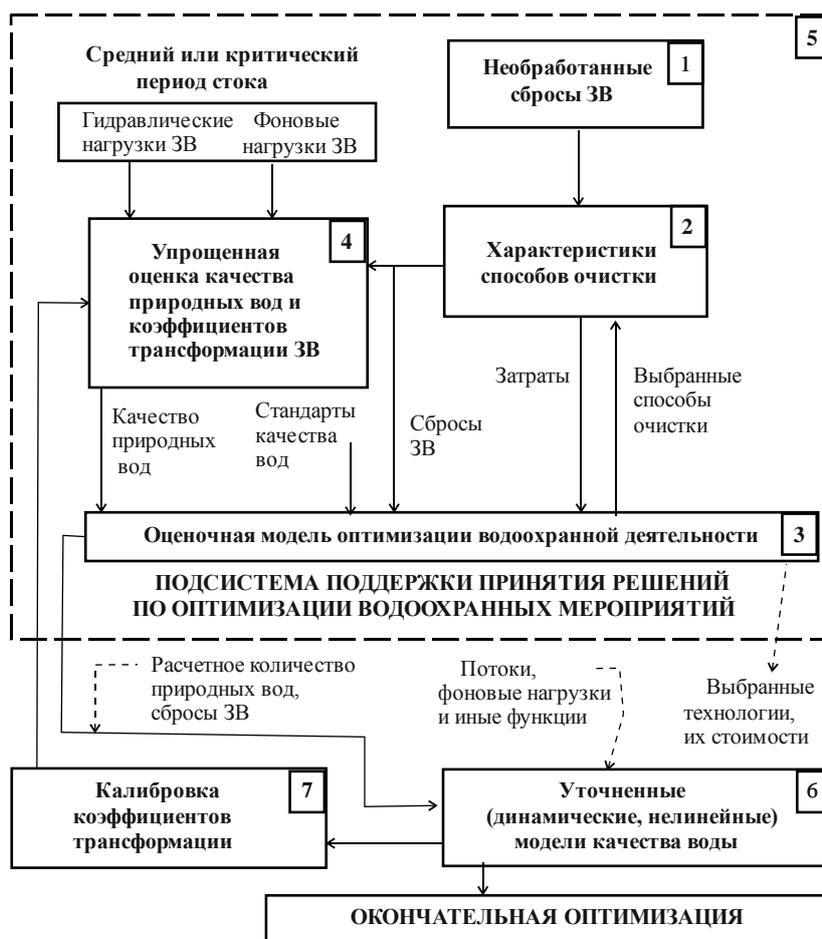


Рисунок 1 – Базовый вариант структуры моделей водоохранной деятельности

Блок 1 объединяет информацию по составу, объемам и режимам сбросов загрязняющих веществ (ЗВ). Возможные мероприятия по обработке этих сбросов систематизированы в блоке 2. При этом для каждого способа очистки сточных вод в разрезе учитываемых ЗВ или их групп заранее составляются производственные функции (ПФ), характеризующие связь между затратами на проведение соответствующих водоохраных мероприятий и степенью очистки.

Оценка качества природных вод должна базироваться на агрегированных уравнениях переноса и трансформации загрязняющих веществ и коэффициентах их трансформации, с учетом суммарного стока ЗВ и усредненной антропогенной нагрузки за критический (обычно маловодный) период времени. Генерируются оценочные коэффициенты трансформации ЗВ на участках реки и

оценивается качество природных вод (блок 4). Затем, зная качество природных вод в створах расчетных участков, можно провести сопоставление его с требованиями соответствующих стандартов, используя оценочную модель оптимизации водоохранной деятельности (блок 3), что позволяет выбрать рекомендуемые технологии очистки, допустимые объемы сбросов ЗВ и требуемые затраты на реализацию мероприятий.

Совокупность математических моделей, представленных блоками 1 – 4 (блок 5), формирует систему обоснования решений по оптимизации водоохранной деятельности. Поиск оптимальных решений здесь сводится к выбору состава мероприятий, обеспечивающих заданное качество вод при минимальных затратах.

Однако такие решения далеко не всегда могут приниматься как окончательные, поскольку они получены на основе приближенной и неполной информации. Поэтому целесообразно уточнить эти решения с помощью моделей (блок 6), учитывающих нелинейность зависимостей, характеризующих качество вод, динамические связи между многими параметрами и пр. Как правило, приходится оперировать временными рядами речного стока и сбросов ЗВ, а прогноз качества воды поступает в эти модели из результатов расчетов по оценочной модели оптимизации. Эти модели позволяют так же уточнить и сами коэффициенты трансформации различных веществ по участкам реки (блок 7). При возникновении существенных невязок между ними и оценочными значениями коэффициентов, полученными при реализации упрощенных моделей блоков 4 и 5, целесообразно вернуться к оценочной модели оптимизации с уточненными показателями качества природных вод, то есть возникает итеративный процесс применения оценочных и детальных моделей.

Принятие решений на уровне водопользователя может быть представлено моделями, в которых, при различных ограничениях в условиях действия экономического механизма платы за загрязнение и мотивов их принятия, оптимизируется целевая функция, включающая не только затраты на проведение мероприятий, но и изменяющиеся при этом платежи за загрязнение водных ресурсов.

Особенности выбора оптимальной стратегии

При выборе оптимальной стратегии водоохранной деятельности как в регионе, так и отдельного водопользования, в ретроспективном периоде определяющим фактором является взаимосвязь и взаимозависимость экологических и экономических показателей и критериев [5, 6, 7].

Существует ряд исследований, в которых предложены подходы, позволяющие оценить экологическое состояние водной среды в зависимости от факторов, определяющих экономическое развитие регионов и их экологическую политику [8, 9].

Наиболее распространен подход, основанный на функциях загрязнения, которые позволяют анализировать различные варианты распределения инвестиций, оценивать влияние изменения структуры экономики и учитывать влияние экологической политики, рассматривая динамику инвестиций и затрат, связанных с охраной водной среды:

$$E(t) = A(t) \cdot X_1^\mu(t) \cdot X_2^{-\eta}(t), \quad (1)$$

$$E(t) = A(t) \cdot X_1^\mu(t) \cdot X_2^{-\eta}(t) \cdot X_3^\nu(t), \quad (2)$$

где $E(t)$ – исследуемый экологический показатель (выбросы загрязняющих веществ, концентрация загрязняющих веществ, сброс загрязненных сточных вод, образование отходов и другие показатели);

$X_1(t)$ – фактор, отражающий развитие экономики и, как правило, отрицательно влияющий на водную среду (инвестиции в производственный сектор, инвестиции в новое строительство, основные фонды и другие показатели);

$X_2(t)$ – фактор, отражающий водоохранную деятельность и положительно влияющий на окружающую среду (инвестиции в охрану окружающей среды, текущие затраты на охрану окружающей среды и другие показатели);

$X_3(t)$ – фактор, отражающий развитие экономики, который может влиять и положительно, и отрицательно на окружающую среду в зависимости от осуществляемой эколого-экономической политики (инвестиции в модернизацию экономики, в машины и оборудование, индекс структурных сдвигов в экономике и другие показатели);

$A(t)$ – нейтральный экологический прогресс (снижение уровня загрязнений за счет других факторов, прежде всего структурных сдвигов);

μ, η, ν – постоянные параметры (факторные эластичности по загрязнению);

t – время.

Так как эти функции используют показатели инвестиций, основной целью будет поиск оптимального распределения инвестиций при ограничениях на общий объем.

При этом оптимальное распределение инвестиций должно быть увязано с максимизацией темпов роста экономики при заданной динамике загрязнений или, наоборот, минимизацией загрязнений при заданном темпе роста экономики [10, 11, 12].

Для трехфакторных экологических инвестиционных функций (Z_3) и двухфакторных функций загрязнения (Z_3) можно рассматривать оптимизационные модели двух типов. В первом случае, когда инвестиции разделяются на три составляющих (новое строительство, модернизация и охрана водной среды), возникает задача оптимального распределения инвестиций по трем направлениям. Оптимальное решение минимизирует загрязнения при обеспечении определенного объема производства $Y_0(t)$.

$$E(t) = F(X_1(t), X_2(t), X_3(t), t) \rightarrow \min, \quad (3)$$

при ограничениях

$$Y(t) = G(X_1(t), X_3(t)) \geq Y_0(t),$$

$$X_1(t) + X_2(t) + X_3(t) = U(t),$$

$$X_1(t) \geq 0, \quad X_2(t) \geq 0, \quad X_3(t) \geq 0, \quad \varepsilon_1 > 0, \quad \varepsilon_2 > 0,$$

где $Y(t)$ – ограничение роста объемов производства;

$U(t)$ – ограничение объема инвестиций;

G – функция роста экономики от объема инвестиций по направлениям.

Следует отметить, что исследуемые направления распределения инвестиций имеют разную эффективность с точки зрения минимизации загрязнений. Инвестиции в новое строительство, как правило, ведут к росту загрязнений, модернизация чаще всего немного уменьшает объем загрязнений, а водоохранная деятельность в большинстве случаев наиболее эффективна и всегда ведет к снижению загрязнений.

При отсутствии ограничений на рост объемов производства или его темпы имеет место достаточно простая ситуация: все ресурсы направляются в наиболее эффективное направление с точки зрения критерия, имеющего максимальное по модулю отрицательное значение полученного по функции (2) параметра (или водоохранная деятельность, или модернизация). Если есть ограничение на рост объемов производства или его темпы, зависящее от объемов нового строительства и модернизации, то решение определяется по изложенной ниже процедуре.

Первый случай – влияние модернизации на загрязнения отрицательно (параметр ν отрицателен). Тогда максимум вложений делается в модернизацию, и если нужный темп достигается, то остальные инвестиции направляются на охрану водной среды или новое строительство в зависимости от величины соответствующего параметра. Если заданный темп не достигается за счет вложений только в модернизацию, то определяется соотношение инвестиций между направлениями на новое строительство и модернизацию, обеспечивающее достижение нужного темпа роста.

Второй случай – модернизация ведет к росту загрязнений (параметр ν положителен). Как правило, коэффициент для нового строительства больше, чем для модернизации. Если при максимальных вложениях средств в модернизацию заданный темп роста достигим, то все оставшиеся ресурсы следует направить на охрану водной среды и природы в целом. Если заданный темп не достигим, то определяем соотношение инвестиций между направлениями на новое строительство и модернизацию, обеспечивающее достижение нужного темпа роста экономики.

Для двухфакторной функции оптимальное распределение минимизирует загрязнения:

$$E(t) = \sum_i E_i(t) = \sum_i F_i(X_{1,i}(t), XU_{2,i}(t), t) \rightarrow \min, \quad (4)$$

при ограничениях:

$$X_1(t) = \sum_i X_{1,i}(t), X_2(t) = \sum_i X_{2,i}(t),$$

$$X_{1,i}(t) \geq 0, X_{2,i}(t) \geq 0, X_{1,i}(t) \geq 0, \varepsilon_{1,i} > 0, \varepsilon_{2,i} \leq 0, i = \overline{1, N},$$

где i – сектор;

N – количество секторов.

Данную модель можно строить для двухфакторных и трехфакторных функций, также возможно найти оптимальное решение в общем случае и при некоторых ограничениях [13].

Если экономика региона достигает достаточно высокого уровня, то ее раз-

витие может описываться экологической кривой Кузнеця, когда с ростом инвестиций объем загрязнений падает. В случае, если обе факторные эластичности отрицательны, то, построив Лагранжиан на основе (1), получим условия оптимального распределения ресурсов:

$$\frac{\varepsilon_{1i} \cdot E_i(t)}{X_{1i}} = \frac{\varepsilon_{1j} \cdot E_j(t)}{X_{1j}}, \quad \overline{i, j = 1, N}, \quad (5)$$

$$\frac{\varepsilon_{2i} \cdot E_i(t)}{X_{2i}} = \frac{\varepsilon_{2j} \cdot E_j(t)}{X_{2j}}, \quad \overline{i, j = 1, N},$$

где i, j – сектора;

N – количество секторов по степени и характеру загрязнения водной среды.

Подставляя в (5) мультипликативные функции (1) и балансовые соотношения из (4), можно получить систему двух нелинейных уравнений с двумя неизвестными, легко решаемую стандартными методами. Если принять, что сумма факторных эластичностей секторов одинакова (при расчетах функций можно ввести такое ограничение), данная система преобразуется в уравнение относительно соотношения двух факторов. В результате оптимальное распределение ресурсов находится при последовательном решении нелинейных уравнений. Для других видов функций, а также при более сложных критериях получается система нелинейных уравнений [14, 15, 16].

Учитывая, что для функций (5) рассматриваются кумулятивные инвестиции или объемы производства, что усложняет перемещение ресурсов (затраченные несколько лет назад инвестиции неперемещаемы), можно перейти к функциям приростным или темповым.

Оптимальное решение может быть найдено и в общем случае, когда инвестиции можно распределять и по направлениям, и по секторам:

$$E(t) = \sum_i E_i(t) = \sum_i F_i \left(X_{1,i}(t), X_{2,i}(t), X_{3,i}(t) \right) \rightarrow \min, \quad (6)$$

при ограничениях

$$X_1(t) = \sum_i X_{1,i}(t), \quad X_2(t) = \sum_i X_{2,i}(t), \quad X_3(t) = \sum_i X_{3,i}(t),$$

$$Y(t) = G(X_1(t), X_3(t)) \geq Y_0(t),$$

$$X_{1,i}(t) \geq 0, \quad X_{2,i}(t) \geq 0, \quad X_{3,i}(t) \geq 0, \quad \varepsilon_{1,i} > 0, \quad \varepsilon_{2,i} \leq 0, \quad i = \overline{1, N}.$$

Не менее существенна и проблема поиска путей сокращения сбросов ЗВ водопотребителями. Отсюда стратегию водоохранной деятельности нужно формулировать в виде оптимизационной задачи с критерием минимизации суммарных приведенных затрат при условии достижения комплекса требуемых стандартов качества водных ресурсов и, соответственно, с учетом ограничений на концентрацию и массу сброса ЗВ. Расчетная система уравнений имеет вид [15, 17]:

$$S = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (S_{it} \cdot x_{it}) \rightarrow \min; \quad (7)$$

при ограничениях

$$C_{jr} = C_{jr}^0 + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (m_{ijt} \cdot \theta_{ir} \cdot x_{it}) \leq \bar{C}_{jr}, \quad j \in J, \quad r \in R, \quad (8)$$

$$M_{jr} = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (m_{ijt} \cdot x_{it}) \leq \bar{M}_{jr}, \quad M_j = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (m_{ijt} \cdot x_{it}) \leq \bar{M}_j, \quad j \in J, \quad r \in R, \quad (9)$$

где M_{jr} , M_j – соответственно, суммарные массы сбросов ЗВ в пределах отдельных секторов и в пределах всего бассейна;

C_{jr} – предельно допустимая концентрация (ПДК) i -ой компоненты;

m_{ijt} – масса минимально возможного сброса, соответствующая технологии очистки с максимальными затратами S_{it} .

Следует отметить, что в целом не существует особых гарантий повышения эффективности водоохранной деятельности только за счет использования экономических механизмов. Более того, последние не исключают традиционного планирования стратегии улучшения качества природных вод. Экономические механизмы могут быть только одним из важных компонентов, позволяя повысить рентабельность водоохранных мероприятий.

Простейший способ отражения в математических моделях экономических механизмов - это введение в целевую функцию штрафных платежей. Тогда задача оптимизации водоохранной деятельности формулируется в виде:

$$\hat{S} = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (S_{it} \cdot x_{it}) + \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} (\Delta c_{jr} \cdot p_{jr}) \rightarrow \min, \quad (10)$$

при ограничениях

$$c_{jr} = c_{jr}^0 + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (m_{ijt} \cdot \theta_{ir} \cdot x_{it}), \quad \Delta c_{jr} = \max(0; c_{jr} - \bar{C}_j); \quad (11)$$

$$j \in J, \quad r \in R, \quad c_{jr} = \Delta c_{jr} \leq \bar{C}_{jr},$$

где Δc_{jr} – возможное нарушение норматива ПДК (величины \bar{C}_j) по j -му ЗВ в створе r .

Заключение

Интенсификация хозяйственной деятельности и соответствующее технологическое усложнение схем функционирования водохозяйственных объектов и систем достигли к настоящему времени такого уровня, что детерминистское описание причинной обусловленности всех процессов оказалось несоответствующим действительности. Всегда имеется элемент случайности, который зачастую приводит к возникновению нежелательных, в том числе и катастрофических ситуаций.

Анализ представленных моделей показывает, что базовый вариант внутренней структуры системы математических моделей по выбору оптимальной стратегии водоохранной деятельности в бассейне реки в общем случае должен включать в себя:

- модели механизмов управления водопользованием;
- целевые функции сторон – участников процесса;
- производственные функции различных видов водоохранной деятельности,

учитывающие связь затрат на очистку со степенью очистки ЗВ.

Список цитированных источников

1. Волчек, А. А. Оценка и прогноз воздействия природопользования и природообустройства на окружающую среду / А. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Рязань : РГТУ, 2015. – 117 с.
2. Кудинов, Г. А. Инновационные подходы в обеспечение устойчивого развития экономико-экологических систем региона / Г. А. Кудинов // Труды института экологии. – Тольятти, 2011. – С. 267 – 269.
3. Калинин, М. Ю. Чрезвычайные ситуации и их последствия: мониторинг, оценка, прогноз и предупреждение / М. Ю. Калинин, А. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Минск : Белсэкс, 2010. – 275 с.
4. Пряжинская, В. Г. Концепция планирования водоохранной деятельности / В. Г. Пряжинская, Л. К. Левит-Гуревич // Обоснование стратегии управления водными ресурсами. – Москва : Научный мир, 2006. - С. 206 – 217.
5. Бурлибаев, М. Ж. Проблемы оптимизации природопользования и природообустройства в математических моделях и методах / М. Ж. Бурлибаев, А. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Алматы : Каганат, 2003. – 532 с.
6. Волчек, А. А. К проблемам моделирования динамики развития и локализации экологических последствий / А. А. Волчек, П. В. Шведовский // Вестник БГТУ. – 2002. – Сер. 2. – № 2(14). – С. 45–46.
7. Волчек, А. А. Математические модели в природопользовании / А. А. Волчек, П. В. Шведовский, Л. В. Образцов. – Минск : БГУ, 2002. – 281 с.
8. Кротов, В. Ф. Методы и задачи оптимального управления / В. Ф. Кротов, В. И. Гурман. – Москва : Наука, 1973. – 309 с.
9. Левит-Гуревич, Л. К. Основные положения перспективного планирования и систем принятия решений / Л. К. Левит-Гуревич // Обоснование стратегии управления водными ресурсами. – Москва : Научный мир, 2006. - С. 66 – 77.
10. Иванчук, А. В. Актуальные вопросы экономической оценки ущерба вследствие загрязнения водных объектов / А. В. Иванчук // Вестник Саратовского государственного социально-экономического института. - 2010. - № 5(34). - С. 76-79.
11. Гурман, В. И. Моделирование процессов в природно-экономических системах / В. И. Гурман, – Новосибирск : Наука, 1982. – 175 с.
12. Методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды, 1986.
13. Ивченко, Б. П. Теоретико-информационные методы анализа и статистической интерпретации результатов экологического мониторинга / Б. П. Ивченко, Л. А. Мартыщенко // Сборник докладов Межд. научно-техн. конференции «Экология и развитие Северо-запада России». – Санкт-Петербург, 1998. – С. 39 – 47.
14. Пряжинская, В. Г. Современные методы управления качеством речных вод урбанизированных территорий / В. Г. Пряжинская // Водные ресурсы. - 1996. - Т. 23, № 2. - С. 168 – 176.
15. Пряжинская, В. Г. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами / В. Г. Пряжинская, Д. М. Ярошевский, Л. К. Левит-Гуревич. – Москва : Физматлит, 2002. – 493 с.
16. Райфа, Г. Анализ решений. Введение в проблему выбора в условиях неопределенности / Г. Райфа. – Москва : Наука, 1970. – 402 с.
17. Савичев, О. Г. Управление водными ресурсами / О. Г. Савичев, О. Г. Токаренко. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 126 с.