

Адабияттар

1. Вуд. Дж. Солнце, Луна и древние камни /Дж.. Вуд. М.: 1981.
2. Жусупакматов Л. Саймалы-Таш сүрөт-жазма сырлары /Л Жусупакматов.- Бишкек, 1998.
3. Калыбеков. А. Кыргыз жылсанагын илимий негиздери / А.Б. Калыбеков. 2016.
4. Карасаев К. Накыл сөздөр /К. Б.: Карасаев .-Бишкек,1992.
5. Климишин И.А. Календарь и хронология /И.А Климишин.- М., 1985.
6. Мамбетакунов Э. Астрономия илиминин өнүгүшү / Э. Мамбетакунов, А. Калыбеков.- Бишкек,2014.
7. Находкин С.С., Кононова С.К. и др. Анализ луннофазной зависимости основных гармонов эндокринной системы человека / С.С Находкин., С.К Кононова., и др. //Вестник РАМН. 2014 - №5. -С. 29-35
8. Осадчук Л.В. Гармональный профиль качество спермы у мужчин Восточной Сибири / Л.В Осадчук, М. Клещев и др. //Вестник РАМН. 2012 - №3.- С. 50-55.
9. Сейдакматов К. Кыргыз элинин календардык түшүнүгү / К. Сейдакматов - Ф.: Кыргызстан,1987.
10. Ташбаева К.И. Петроглифы Центральной Азии /К.И.. Ташбаева.- Алматы. 2001.
11. Петроглифы Южнога Кыргызстана. Фонд Истори Северо Восточной Азии/ Чжан Со Хо, Т.Т. Чаргынов, О.А. Солтобаев, К.И Ташбаева,2012.
12. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Stellarium&oldid=70829387>»

УДК 504.064.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ САМООЧИЩЕНИЯ МАЛЫХ РЕК В УСЛОВИЯХ РЕЗКО КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ¹

Милошевич Хранислав, д.т.н., профессор, Faculty of Science and Mathematics, University of Pristina, Косовская Митровица, Сербия, e-mail: mhrane@gmail.com

Тасейко Ольга Викторовна, к.ф.-м.н., доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», 660014, Россия, г. Красноярск, пр. им. газ. "Красноярский рабочий", 31, e-mail: taseiko@gmail.com

Спицына Татьяна Павловна, к.т.н., Сибирский государственный технологический университет, 660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, 82, e-mail: t-spitsina@mail.ru

Панич Стефан, Ph.Dr., associated professor, Faculty of Science and Mathematics, University of Pristina, Косовская Митровица, Сербия, e-mail: stefanpnc@yahoo.com

Целью работы являлось математическое описание процессов самоочищения малых рек и определение химико-биологических параметров модели с учетом региональных особенностей. Для описания процессов самоочищения вод используется одномерное уравнение, описывающее адвективный перенос загрязняющих веществ. Одномерная модель будет адекватно описывать происходящие процессы только для условий малых рек, характеризующихся незначительным изменением основных параметров по горизонтальной и вертикальной координатам сечения водотока, отсутствием поперечных течений. Модель включает уравнения для описания трансформации компонентов фосфора и азота. Основные процессы трансформации, учитываемые в модели касаются нитрификации, денитрификации, минерализации компонентов, а также аэрации и биохимического окисления органического вещества. Для уточнения параметров модели применялись результаты наблюдений государственной сети мониторинга на изучаемых водных объектах в течение 15 лет. Также использовались данные экспедиционных наблюдений авторского коллектива.

¹ Работа поддержана грантом РФФИ № 15-07-06982

Ключевые слова: моделирование самоочищения водотоков, аэрация, биохимическое окисление, региональные особенности самоочищения

SELF-PURIFICATION MODELLING OF THE SMALL RIVERS IN CENTRAL SIBERIA

Milosevic Hranislav, Professor, Faculty of Science and Mathematics, University of Kosovska Mitrovica, Kosovska Mitrovica, Serbia, e-mail: mhrane@gmail.com

Taseiko Olga Viktorovna, PhD (mathematics and physics), Associate Professor, Siberian State Aerospace University, Office A-406, 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, Russia 660014, e-mail: taseiko@gmail.com

Spitsina Tatyana Pavlovna, PhD (Engineering), Associate Professor, Siberian State Technological University, Mira av., Krasnoyarsk, 82, e-mail: t-spitsina@mail.ru

Panic Stefan, PhD (Engineering), Associate Professor, Faculty of Science and Mathematics, University of Kosovska Mitrovica, Kosovska Mitrovica, Serbia, e-mail: stefanpnc@yahoo.com

The purpose of this article is to describe processes of self-purification in small rivers and to determine chemical and biological parameters taking into account regional features. This work presents one-dimensional equation for advective transfer of pollutants to characterize self-purification processes of water flow. The one-dimensional model describes adequately these processes only for small rivers which are characterized by minor change of key parameters across horizontal and vertical coordinates of stream, lack of cross currents. The model includes the equations for transformation of phosphorus and nitrogen components. Biochemical part of the model includes principle factors such as biological oxidation, nitrogen's nitrification and denitrification, and phosphorous mineralization. The model's parameters were specified with using data of the state monitoring network in some rivers of the Central Enisey's basin. Also the data of additional observations conducted by authors were used.

Keywords: self-purification modeling, aeration, biochemical degradation, natural-climatic conditions of self-purification

Введение

Процессы самоочищения водных объектов учитывают в различных аспектах природоохранной деятельности. Интенсивное антропогенное воздействие приводит к трансформации и ослаблению этих процессов, вследствие чего может происходить необратимая перестройка биотической и абиотической структуры [7].

Вклад отдельных процессов в самоочищение зависит от природы загрязняющих веществ, температуры, гидрохимических и гидрологических характеристик водоема и видового состава гидробиоценоза. Как правило, биохимические механизмы вносят основной вклад в процесс самоочищения и только при угнетении гидробионтов под действием тяжелых металлов, нефтепродуктов и других токсикантов более существенную роль начинают играть химические и физико-химические процессы. Биохимическая трансформация загрязняющих веществ происходит в результате их включения в трофические цепи и в ходе процессов продукции и деструкции. Проблема количественной оценки всех факторов самоочищения очень сложна и далека от окончательного решения [3, 10, 12]. Наибольшее распространение получили модели гидродинамического разбавления примесей [9].

Большая часть работ, исследующих вопросы самоочищения, связана с лимническими системами (в озерах, водохранилищах). Гораздо меньше работ посвящено рекам, особенно малым. Малые реки выполняют функцию природного «фильтра», и тем самым, сохраняют крупные реки от избыточного поступления в них речных наносов. Их изучение, как

первичных звеньев гидрологических сетей, является одной из актуальных задач экологии водных систем.

При оценке самоочищающей способности водотоков важно учитывать региональные условия. К основным управляющим параметрам процессов самоочищения, имеющим явно выраженную региональную специфику, относятся климатические факторы, рельеф, лесистость территории, шероховатость дна, гидрологические характеристики водного объекта, наличие подземных источников питания [1].

Целью работы являлось математическое описание процессов самовосстановления малых рек и определение химико-биологических параметров модели с учетом региональных особенностей.

1. Объект исследования

В качестве объекта исследования была выбрана в р. Кача, относящаяся к категории малых рек. Малые реки особо чувствительны к различным видам загрязнений. Быстрый отклик на изменения, происходящие на водосборе в условиях антропогенной нагрузки, связан с более малыми объемами стока, небольшими скоростями течения и в силу этого более низкой способностью самоочищения русловых вод малых рек.

Резко-континентальный климат региона Центральной Сибири и природные условия формируют неоднородное распределение водности реки Кача. В результате этого расход реки и скорость течения значительно варьируют в разные гидрологические фазы. Вместе с этим существенно меняются такие характеристик речных вод, как температура, содержание взвешенных и растворенных веществ, интенсивность перемешивания. Все эти факторы в совокупности определяют региональные особенности внутриводоемных процессов, формирующих самоочищающуюся способность реки.

Для уточнения параметров и верификации модели использовались результаты наблюдений на постах государственной сети мониторинга ГУ «Красноярский ЦГМС-Р» за период с 1985 по 2010 гг. в р. Кача бассейна Среднего Енисея (3 створа). Отбор проб на наблюдательной сети осуществляется в основные фазы гидрологического режима (не более 7 раз в год). В работе применялись средние концентрации основных биогенных элементов: азота аммонийного, нитратного и нитритного, фосфатов, азота и фосфора общего. Дополнительно в 2013 - 2015 гг. в р.Кача определялись комплексные параметры: рН, растворенный кислород, БПК, окислительно-восстановительный потенциал, электропроводность. Частота отбора проб составляла 2 раза в неделю в течение всего периода незамерзания реки.

2. Математическое описание модели самоочищения

Для описания процессов самоочищения вод используется одномерное уравнение диффузии, описывающее адвективный перенос загрязняющих веществ [2, 6, 8]. Одномерная модель будет адекватно описывать происходящие процессы только для условий малых рек, характеризующихся незначительным изменением основных параметров по горизонтальной и вертикальной координатам сечения водотока, отсутствием поперечных течений. Для крупных рек подобное предположение не является корректным.

В пренебрежении коэффициентом диффузии, получаем следующий вид уравнения [11]:

$$\frac{\partial(\omega \cdot C_i)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_i)}{\partial x} = -K_{C_i} \cdot C_i, \quad (1)$$

K_{C_i} – коэффициент деструкции загрязняющего вещества, представляющий собой удельную скорость его трансформации в результате совокупного действия физико- и биохимических процессов, Q – расход воды, ω – площадь поперечного сечения водотока.

Модель включает уравнения для описания следующих переменных: фосфаты C_{PO_4} , фосфор общий C_{DOP} , азот аммонийный C_{NH_4} , азот нитратный (включая азот нитритный)

C_{NO_3} , азот общий C_{DON} , биохимическое потребление кислорода (БПК) C_{org} и растворенный кислород C_{O_2} . Основные процессы трансформации указанных переменных: нитрификация, денитрификация, минерализация, аэрация и биохимическое окисление.

Кроме того, в системе учитывается скорость трансформации каждой фракции K_i (сут^{-1}) и скорость поступления компонентов с нагрузкой, связанной со стоком биогенных веществ с территории бассейна G_i ($\text{г}/(\text{м} \cdot \text{сут})$).

Систему уравнений записываем исходя из уравнения (1) с учетом основных процессов трансформации учитываемых переменных:

1) *Фосфаты* ($\text{гP}/\text{м}^3$):

$$\frac{\partial(\omega \cdot C_{PO_4})}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_{PO_4})}{\partial x} = G_{PO_4} + K_{PO_4} \cdot \omega \cdot C_{DOP}, \quad (2)$$

где Q – расход воды ($\text{м}^3/\text{сут}$), ω – площадь поперечного сечения (м^2), K_{PO_4} – удельная скорость минерализации фосфора общего (сут^{-1}).

2) *Фосфор общий* ($\text{гP}/\text{м}^3$):

$$\frac{\partial(\omega \cdot C_{DOP})}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_{DOP})}{\partial x} = G_{DOP} - K_{PO_4} \cdot \omega \cdot C_{DOP}. \quad (3)$$

3) *Азот аммонийный* ($\text{гN}/\text{м}^3$):

$$\frac{\partial(\omega \cdot C_{NH_4})}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_{NH_4})}{\partial x} = G_{NH_4} + K_{NH_4} \cdot \omega \cdot C_{DON} - K_{12} \cdot \omega \cdot C_{NH_4}, \quad (4)$$

где K_{NH_4} – удельная скорость минерализации органического азота (сут^{-1}), K_{12} – удельная скорость нитрификации (сут^{-1}).

4) *Азот нитратный* ($\text{гN}/\text{м}^3$):

$$\frac{\partial(\omega \cdot C_{NO_3})}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_{NO_3})}{\partial x} = G_{NO_3} + K_{12} \cdot \omega \cdot C_{NH_4} - K_{NO_3} \cdot \omega \cdot C_{NO_3}, \quad (5)$$

где K_{NO_3} – удельная скорость процесса денитрификации (сут^{-1}).

5) *Азот общий* ($\text{гN}/\text{м}^3$):

$$\frac{\partial(\omega \cdot C_{DON})}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_{DON})}{\partial x} = G_{DON} - K_{NH_4} \cdot \omega \cdot C_{DON}. \quad (6)$$

6) *БПК* ($\text{гO}_2/\text{м}^3$), рассматриваемое в модели как кислородный эквивалент растворенного органического углерода:

$$\frac{\partial(\omega \cdot C_{org})}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_{org})}{\partial x} = -K_{BOD} \cdot \omega \cdot C_{org} - K_{NO_3} \cdot \omega \cdot \beta_{O_2/DN} \cdot C_{NO_3}, \quad (7)$$

где K_{BOD} – удельная скорость биохимического окисления распада (сут^{-1}), $\beta_{O_2/DN}$ – кислородный эквивалент использования органического углерода в ходе реакции денитрификации ($\text{гO}_2/\text{гN}$).

7) *Растворенный кислород* ($\text{гO}_2/\text{м}^3$):

$$\frac{\partial(\omega \cdot C_{O_2})}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_{O_2})}{\partial x} = K_{BOD} \cdot \omega \cdot C_{org} - K_{12} \cdot \omega \cdot \beta_{O_2/NT} \cdot C_{NH_4} - K_{RO} \cdot \omega \cdot C_{O_2}, \quad (8)$$

где $\beta_{O_2/NT}$ – кислородный эквивалент процесса нитрификации ($\text{гO}_2/\text{гN}$), K_{RO} – коэффициент реаэрации (сут^{-1}).

Для аппроксимации дифференциальных уравнений разностными вводится пространственно-временная сетка $(t_n, x_i): t_{n+1} = t_n + \tau$ ($n = \overline{0, N}$), $x_{i+1} = x_i + \Delta$ ($i = \overline{1, L}$),

где $\tau = const$ – шаг по времени, $\Delta = const$ – шаг по пространственной переменной. Решение полученной системы выполнялось с применением численного алгоритма, основанного на методе бегущего счета первого порядка [2]. Схема составлялась на трехточечном шаблоне с использованием односторонних производных [5].

3. Уточнение параметров модели

Дифференцированный количественный учет отдельных процессов, влияющих на самовосстановление качества воды в водоемах зачастую осуществляют путем изучения кинетики превращений в условиях лабораторного моделирования. Однако перенос получаемых при этом количественных характеристик (коэффициентов скорости превращений химических соединений) непосредственно на водные объекты во многих случаях затруднен, так как в природных условиях на скорость трансформации (распада) вещества оказывают влияние другие протекающие параллельно процессы самоочищения, в частности разбавление [4, 6].

Для уточнения параметров модели был выбран подход предполагающий суммарный учет скоростей превращения веществ, косвенно определяемых по измерениям содержания некоторых показателей в природных условиях.

Наибольшую сложность представляет оценка K_{BOD} – удельной скорости биохимического окисления распада, K_{RO} – коэффициента реаэрации. Определение продукции и деструкции по суточному ходу кислорода в реках производится не часто и осложнено необходимостью учета коэффициентов реаэрации и биохимического распада.

Для определения коэффициентов были использованы некоторые упрощения. В аэробной среде биохимическое окисление органических веществ происходит под воздействием бактерий, поэтому разложение органического вещества можно считать эквивалентным реакции окисления, приводящей к уменьшению содержания растворенного кислорода. Коэффициент K_{BOD} определяется из уравнения (7) без учета влияния содержания аммонийного азота.

Величина коэффициента реаэрации зависит от гидрологических условий водного объекта. Она зависит также от концентрации кислорода в воде, которая в свою очередь зависит от начального загрязнения органическими веществами. Поэтому величина коэффициента K_{RO} определяется из уравнения (8), учитывающего процесс уменьшения концентрации растворенного кислорода в результате биохимического окисления органических веществ и процесс атмосферной реаэрации без учета влияния нитратного азота.

После упрощения уравнения (7) – (8) были расписаны с использованием численного метода бегущего счета на трехточечном шаблоне. Путем преобразований были получены соотношения для определения скоростей реаэрации и биохимической трансформации:

$$K_{BOD} = \frac{1}{C_{(org)i}^{n+1}} \left(-\frac{C_{(org)i}^{n+1} - C_{(org)i}^n}{\tau} - \frac{1}{\omega} \cdot \frac{Q_i^{n+1} \cdot C_{(org)i}^{n+1} - Q_{i-1}^{n+1} \cdot C_{(org)i-1}^{n+1}}{\Delta} \right) \quad (9)$$

$$K_{RO} = \frac{1}{C_{(O_2)i}^{n+1}} \left(-\frac{C_{(O_2)i}^{n+1} - C_{(O_2)i}^n}{\tau} - \frac{1}{\omega} \cdot \frac{Q_i^{n+1} \cdot C_{(O_2)i}^{n+1} - Q_{i-1}^{n+1} \cdot C_{(O_2)i-1}^{n+1}}{\Delta} + K_{BOD} \cdot C_{(org)i}^n \right) \quad (10)$$

Пространственно-временная сетка использовалась та же, что и для основных уравнений.

Коэффициенты трансформации азота и фосфора на данном этапе исследования определялись на основе литературных данных [10]. Влияние температуры воды на исследуемые внутриводоемные процессы учитывается в виде зависимости коэффициентов трансформации от температуры.

4. Результаты и обсуждение

С использованием данных наблюдений за качеством вод р. Кача были оценены скорости процессов реазрации и биохимического окисления путем расчета уравнений (9)-(10). Данные государственной наблюдательной сети позволили рассчитать годовую динамику процессов (Рис. 1). Для уточнения суточного и часового колебания скоростей процессов при расчетах использовались данные дополнительных наблюдений, выполнявшихся с большей регулярностью, чем на стационарных постах.

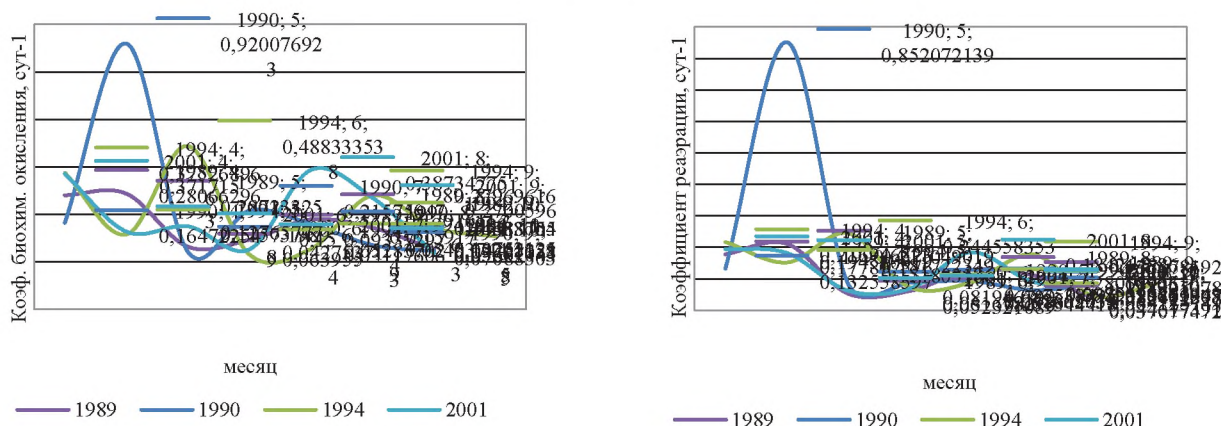


Рисунок 1 – Расчетные значения коэффициентов модели (2)-(8)

Коэффициент реазрации в среднем колеблется в диапазоне: 0,01...0,3, скорость биохимического распада – в диапазоне: 0,1...0,5. Эти характеристики, кроме фактических уровней загрязнения, очевидно, зависят от колебаний расходов воды и сезонных изменений температуры. Этим объясняется явно выраженный внутригодовой ход. Уменьшение интенсивности аэрации в разные годы происходит в разные месяцы, что объясняется колебаниями климатических параметров. Летнее снижение показателя реазрации объясняется снижением расхода воды и скорости течения одновременно с повышением содержания основных биогенных элементов в этот период. Соответственно, интенсивность самоочищения в это время года минимальна. Летние условия в отношении содержания кислорода в реке менее благоприятными, чем зимние (при отсутствии ледяного покрова).

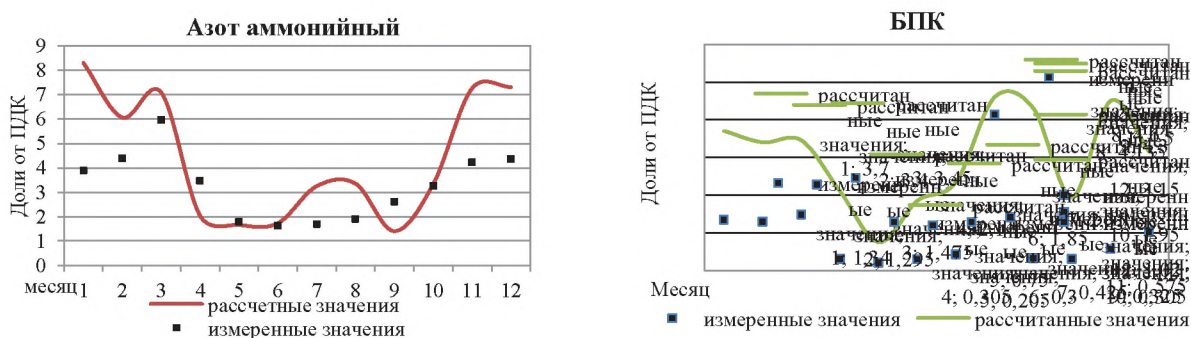


Рисунок 2 – Сопоставление средних значений расчетных концентраций азота аммонийного и БПК с данными наблюдений на р. Кача на постах государственной мониторинговой сети

Предварительные расчеты по предложенной модели показали удовлетворительное согласие результатов моделирования с данными натуральных наблюдений по показателям азота и фосфора (Рис. 2). По показателю БПК результат получился несколько хуже. Возможно, это связано с недостаточно полным учетом некоторых показателей модели, включенных в уравнение для определения этого параметра.

В дальнейшем предполагается оценить значимость каждого из учитываемых в модели процессов с целью корректировки полученной модели.

Список литературы

1. Башенхаева Н. В. О самоочищающей способности вод реки Селенги / Н. В. Башенхаева // *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Материалы Третьей всероссийской конференции с международным участием*. Барнаул, 24-28 августа 2010 г. – Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. – С. 14-18.
2. Белолипецкий В.М. Численное моделирование процессов эвтрофирования в нижнем бьефе водохранилища-охладителя / В.М. Белолипецкий, В.Б. Туговиков, А.А. Цхай // *Вычислительные технологии*. – 1997. – Т. 2. – № 2. – С. 5 – 19.
3. Охрана окружающей среды / А.М. Владимиров, Ю.И. Ляхин, Л.Т. Матвеев, В.Г. Орлов. – Ленинград: Гидрометеиздат. – 1991. – 424 с.
4. Кислородный режим рек как показатель продукционно-деструкционных процессов в реках / А.В. Гончаров, М.Б. Заславская, В.А. Исаев, Е.Е. Лобченко, И.П. Ничипорова // *Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах»*. 10–14 сентября 2012 г. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2012. – С. 216-218.
5. Калиткин Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука. – 1978. – 543 с.
6. Караушев А.В. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод. – Ленинград: Гидрометеиздат. – 1981. – 176 с.
7. Толокнова А.Н. Разработка концепции определения самоочищающейся способности водных экосистем и ее аппаратная реализация / *Электронный научный журнал «Исследовано в России»*: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/107.pdf>
8. Тучковенко Ю.С. Трехмерная математическая модель качества вод Днепровско-Бугского приустьевоего района северо-западной части Черного моря / *Екол. без-пека прибереж. та шельфової зон та комплекс. використ. ресурсів шельфу*. – 2005. – Вып. 12. – С.374-391.
9. Benedini M. Water quality models for rivers and streams. State of the art and future perspectives / M. Benedini // *European water* 34 (2011). – P. 27-40.
10. Mannina G. River water quality assessment: a hydrodynamic water quality model for propagation of pollutants / G. Mannina, G. Viviani // *Water Sci Technol*. 2010;62(2):288-99. doi: 10.2166/wst.2010.285.
11. Marsili-Libelli S. Water quality modelling for small river basins / S. Marsili-Libelli, E. Giusti // *Environmental Modelling & Software*. – 23 (2008). – P. 451-463.
12. Rauch W. River water quality modelling: I. State of the art / W. Rauch, M. Henze, L. Koncsos, P. Reichert, P. Shanahan, L. Somlyódy and P. Vanrolleghem // *Wat. Sci. Tech.*, 38(11), 237–244.