
УДК 552.482.2:577.4

Доктор техн. наук Ж.С. Мустафаев ¹
Доктор техн. наук А.Т. Козыкеева ¹
Курманбек Жанымхан ¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМОЙ НАГРУЗКИ В ВОДОСБОРАХ БАСЕЙНА РЕКИ КАРАТАЛ

Ключевые слова: водосбор речного бассейна, экология, вода, вещество, загрязнение, норма, продуктивность, уравнение гидрохимического баланса, нагрузка, модель

На основе уравнения гидрохимического баланса и однофакторной зависимости, разработана математическая модель для определения предельно-допустимой нагрузки в бассейне реки. Она включает прогнозирование концентрации загрязняющих веществ в реке, предельно-допустимого уровня безвозвратного водопотребления и экологического стока. Модель реализована для бассейна р. Каратал.

Введение. Прогрессирующее загрязнение бассейнов малых рек в результате антропогенной деятельности городских и промышленных объектов – одна из актуальнейших проблем современной экологической науки. Актуальность проблемы связана с тем, что русла этих рек принимают основную техногенную нагрузку от сельскохозяйственных и промышленных предприятий – природопользователей, находящихся, порой, на достаточно большом удалении друг от друга и относящихся к различным административно-территориальным единицам в территориях водосбора речных бассейнов. Водотоки при этом выполняют транспортную функцию и переносят токсичные загрязняющие вещества с одних территорий, расположенных в верховьях реки, на которых они были образованы и поступили в водоток, на другие – соседние, расположенные в низовьях, которые вынуждены принимать на себя этот токсичный и загрязненный поток. Таким образом, перенос загрязняющих веществ вызывает целый ряд проблем не только экологических, но и нормативно-правовых, экономических, которые требуют необходимости разработать методологическое

¹ Казахский национальный аграрный университет, г. Алматы, Казахстан

обеспечение для определения предельно-допустимой нагрузки в водосборах речных бассейнах.

Цель исследования – оценка допустимого уровня воздействия в водосборе бассейна р. Каратал. Разработка математической модели, позволяющей определить экологический сток, допустимые пределы безвозвратного водопотребления и загрязнения, обеспечивающей устойчивость водной экосистемы.

Материалы и методы исследования. На основе уравнения гидрoхимического баланса веществ и относительной продуктивности растительности от речного стока, а так же содержания загрязняющих веществ – позволяет описать поведение водной системы, находящейся в состоянии устойчивого равновесия. С учетом влияния природных и антропогенных факторов получена математическая модель, характеризующая уравнение баланса веществ, относительно концентрации (C_p) [3, 4]:

$$C_p = \frac{g_{\bar{o}} \cdot C_{\bar{o}}}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bon})} + \frac{g_{bon} \cdot (K_b \cdot C_{\bar{o}} + K_{nz} \cdot C_{\bar{o}})}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bon})} - \frac{b_{max} \cdot S(w) \cdot S(c)}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bon})},$$

где A – безразмерный показатель, характеризующий отношение естественного стока реки (норма стока) (W_p) к объему речного стока ($W_{\bar{o}}$); $g_{\bar{o}}$ – модуль стока воды с водосборной площади, л/с·км²; g_{bon} – модуль водопотребности в бассейне реки; $C_{\bar{o}}$ – удельный вынос вещества с единицы водосборной площади; b_{max} – удельный максимальный объем веществ, поглощаемых водной растительностью из единицы объема воды, кг/м³; K_b – коэффициент возвратных вод; K_{nz} – коэффициент подземных вод; $S(w)$ – показатель, учитывающий влияние объема воды в реке на продуктивность растительности; $S(c)$ – показатель, учитывающий загрязненность в речной воде, рассматриваемым веществом.

Функции $S(w)$ и $S(c)$, представляют собой однофакторные зависимости, имеющие вид куполообразных кривых, достаточно хорошо описываемых формулой В.В. Шабанова [7]:

$$S(\varphi) = \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_{opt}} \right)^{\gamma \cdot \varphi_{opt}} \cdot \left[\frac{(1 - \varphi_i)}{(1 - \varphi_{opt})} \right]^{\gamma \cdot (1 - \varphi_{opt})},$$

где $S(\varphi)$ – относительная продуктивность водной полупогружной растительности; φ_i – фактическое значение рассматриваемого фактора среды;

φ_{opt} – оптимальное значение рассматриваемого фактора среды; γ – параметр саморегуляции водной полупогружной растительности.

Таким образом, математическая модель, позволяет определить экологически допустимые пределы воздействия на основе принципа Лешателье-Брауна, который констатирует, что «внешнее воздействие выводящее систему из равновесия, стимулирует в ней процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия» [6].

Результаты исследования. На основе разработанной математической модели, проведен численный эксперимент для определения предельно-допустимого уровня использования водных ресурсов р. Каратал с учетом не только объема или расхода сброса загрязненных сточных вод населенных пунктов и промышленных объектов, а также поступающих коллекторно-дренажных вод с орошаемых массивов.

При этом функцию зависимости относительной продуктивности водной полупогружной растительности от речного стока ($S(w)$) и содержание загрязняющих веществ ($S(c)$) представим в виде произведения функций ($S(w, c)$): $S(w, c) = S(w) \cdot S(c)$.

Оценка относительной продуктивности водной полупогружной растительности в бассейне Каратала произведена при $\gamma = 5,0$ [2]; $\varphi_{opt}^w = 0,70$ – относительное оптимальное значение допустимого предела безвозвратного водозабора; $\varphi_{opt}^c = 0,30$ – относительное оптимальное значение содержания загрязняющих веществ в водах речного бассейна; $\varphi_i = 0 \dots 1$ – диапазон изменения рассматриваемых факторов среды (табл. 1).

Таблица 1

Относительная продуктивность водной полупогружной растительности в бассейне р. Каратал

φ_i	$S(w)$	$S(c)$	$S(w) \cdot S(c)$
0,1	0,005	0,464	0,002
0,2	0,052	0,864	0,045
0,3	0,185	1,000	0,185
0,4	0,396	0,897	0,355
0,5	0,665	0,630	0,418
0,6	0,896	0,399	0,358
0,7	1,000	0,182	0,182

φ_i	$S(w)$	$S(c)$	$S(w) \cdot S(c)$
0,8	0,867	0,054	0,047
0,9	0,463	0,005	0,002
1,0	0,000		

Относительная продуктивность водной полупогружной растительности ($S(\varphi)$) в зависимости от диапазона изменения рассматриваемых факторов среды (φ_i), дает максимальные значения, расположенные в зоне оптимального значения рассматриваемых факторов среды (φ_{opt}).

Максимальные значения $S(w, c)$, учитывающие совместное влияние объема воды в реке ($S(w)$) и загрязненности речной воды определенным веществом ($S(c)$) находится в пределах 0,40. Это характеризует нижний предел максимально-возможного значения экологического стока, обеспечивающего экологическую устойчивость природной системы в водосборах речного бассейна.

На основе использования уравнения гидрохимического баланса для оценки внешнего воздействия на речную экологическую систему можно использовать первые два слагаемых, обозначив их как некоторую концентрацию (C_{pm}), характеризующую самоочищение вод речных бассейнов:

$$C_{pm} = \frac{g_{\bar{\sigma}} \cdot C_{\bar{\sigma}}}{(A \cdot g_{\bar{\sigma}} + g_{bon})} + \frac{g_{bon} \cdot (K_b \cdot C_{\bar{\sigma}} + K_{nz} \cdot C_{\bar{\sigma}})}{(A \cdot g_{\bar{\sigma}} + g_{bon})},$$

где C_{pm} – концентрация, формирующаяся под влиянием природно-техногенной деятельности.

При этом, объем вещества поглощенного водной полупогружной растительностью определяется с использованием третьего слагаемого уравнения гидрохимического баланса вещества:

$$C_{pb} = \frac{b_{max} \cdot S(w) \cdot S(c)}{(A \cdot g_{\bar{\sigma}} + g_{bon})} = C_b \cdot S(w) \cdot S(c),$$

где C_{pb} – показатель самоочищающей способности водной полупогружной растительности, т.е. $C_b = b_{max} / (A \cdot g_{\bar{\sigma}} + g_{bon})$.

Если известна концентрация (C_{pm}), которая формируется под влиянием природно-техногенной деятельности, тогда с учетом самоочищаю-

щей способности водной полупогружной растительности (C_{pb}), уравнение имеет следующий вид:

$$C_p = C_{pm} - \frac{b_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c)}{(A \cdot g_{\sigma} + g_{bon})} = C_{pm} - C_b \cdot S(w) \cdot S(c).$$

Анализ математических моделей, характеризующих уравнение баланса веществ, относительно концентрации (C_p) показывает, что производная функции, описывающей изменение стационарного состояния системы по рассматриваемым факторам, т.е. W_i и C_i , должна быть возрастающей: $dC_p / dw > 0$, $dC_p / dc > 0$.

Следует отметить, во-первых, функция достаточно хорошо отвечает условию, когда для нормального развития водной полупогружной растительности, согласно закону Ю. Либиха, требуется одновременно стечение ряда обстоятельств, чтобы она потеряла биологическую устойчивость, достаточно критической ситуации по одному из рассматриваемых факторов [5]. Во-вторых, однофакторные зависимости $S(w)$ и $S(c)$, определяются концентрацией C_{σ} , а не C_p , так как последняя – это результат действия самоочищения водной полупогружной растительности (C_{pb}). В третьих, для определения предельно-допустимого воздействия природно-техногенной системы, производная функции C_p берется только по переменным параметрам состояния реки (W_i , C_i). В четвертых, предельно-допустимая концентрация определяется при фиксированном значении речного стока и наоборот, минимально-допустимый сток воды при фиксированном уровне загрязненности реки.

Для определения предельно-допустимого воздействия природно-техногенной системы в водосборах бассейна р. Каратал использованы следующие значения водной экосистемы: $A = 0,35$ – безразмерный показатель, характеризующий отношение естественного стока реки (норма стока или экологического стока) (W_p или W_{σ}) к объему речного стока (W_{σ}); $b_{\max} = 0,20$ – удельный максимальный объем веществ, поглощаемых водной растительностью из единицы объема воды, кг/м³; $g_{\sigma} = 3,55$ модуль стока с водосбора (л/с·км²); $K_b = 0,50$ – коэффициент возвратных вод; $K_{пз} = 0,25$ – коэффициент подземных вод; $C_p^{opt} = 0,30$ – оптимальная для водной по-

лупогружной растительности концентрация вещества в реке (г/л); $C_p^{\max} = 1,00$ – максимальная для водной полупогружной растительности концентрация вещества в реке (г/л) (рис. 1, табл. 2).

Таким образом, как видно на рис. 1, построенном на основе данных табл. 2, изменения концентрации (C_{pm}) в водосборах бассейна р. Каратал увеличивается с увеличением значения удельного выноса вещества с единицы водосборной площади ($C_{\bar{o}}$).

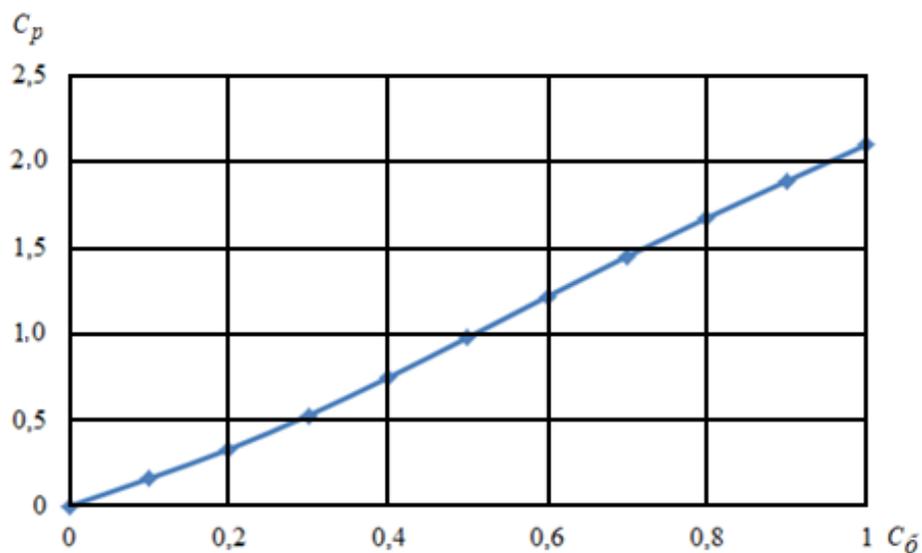


Рис. 1. Зависимость концентрации (C_{pm}) в водосборах бассейна реки, формирующейся в результате природно-техногенной деятельности от удельного выноса вещества с единицы водосборной площади ($C_{\bar{o}}$).

Таблица 2
Определение предельно-допустимого диапазона воздействия факторов в водосборах бассейна р. Каратал

Показатель	Диапазон воздействия факторов среды ($C_{\bar{o}}$)					
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
A	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350
$g_{\bar{o}}$	3,550	3,550	3,550	3,550	3,550	3,550
$A \cdot g_{\bar{o}}$	1,242	1,242	1,242	1,242	1,242	1,242
g_{bon}	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700
$A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bon}$	1,942	1,942	1,942	1,942	1,942	1,942

Показатель	Диапазон воздействия факторов среды (C_{δ})					
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$g_{\delta} \cdot C_{\delta}$	0,000	0,710	1,420	2,130	2,840	3,550
$\frac{g_{\delta} \cdot C_{\delta}}{(A \cdot g_{\delta} + g_{bon})}$	0,000	0,365	0,731	1,097	1,463	1,829
$K_b + K_{нз} = K_{bnn}$	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
$K_{bnn} \cdot C_{\delta}$	0,000	0,150	0,300	0,450	0,600	0,750
$K_{bnn} \cdot C_{\delta} \cdot g_{bon}$	0,000	0,105	0,210	0,315	0,420	0,525
$\frac{g_{bon} \cdot C_{\delta} \cdot K_{bnn}}{(A \cdot g_{\delta} + g_{bon})}$	0,000	0,054	0,108	0,162	0,216	0,270
C_{pm}	0,000	0,419	0,839	1,259	1,679	2,099
$S(c)$	0,000	0,864	0,897	0,399	0,054	0,000
$S(c) \cdot b_{max}$	0,000	0,173	0,179	0,080	0,011	0,000
$\frac{b_{max} \cdot S(c)}{A \cdot g_{\delta} + g_{b\delta}}$	0,000	0,089	0,092	0,041	0,005	0,000
C_p	0,000	0,333	0,747	1,218	1,674	2,099

Для системного анализа поведения функции $V(C_p) = f(\varphi)$ необходимо рассматривать ее производные относительно рассматриваемых факторов среды, т.е. $V'(C_p) = f'(\varphi)$, тогда уравнение можно представить в следующем виде:

$$V'(C_p) = \lim_{\Delta\phi \rightarrow \infty} \frac{f(\phi + \Delta\phi) - f(\phi)}{\Delta\phi} \approx \frac{f(\phi + \Delta\phi) - f(\phi)}{\Delta\phi}.$$

Таким образом, в зависимости от концентрации загрязняющих веществ в реке (C_{δ}), определение производной от концентрации загрязняющих веществ в реке dC_p/dC_{δ} , без учета самоочищающей способности водной полупогружной растительности приведено в табл. 3 и представлено на рис. 2.

Таблица 3

Определение производной функции в зависимости от концентрации загрязняющих веществ в р. Каратал, без учета самоочищающей способности водной полупогружной растительности

C_{δ}	C_p	dC_p/dC_{δ}
--------------	-------	--------------------

$C_{\bar{o}}$	C_p	$dC_p / dC_{\bar{o}}$
0,1	0,160	1,60
0,2	0,333	1,73
0,3	0,527	2,39
0,4	0,747	2,20
0,5	0,980	2,33
0,6	1,218	2,38
0,7	1,451	2,33
0,8	1,674	2,23
0,9	1,888	2,14
1,0	2,099	2,11

Как видно на рис. 2, максимальное значение функции наблюдается в пределах 0,40...0,60, что дает возможность их использования для оценки предельно-допустимого значения речного стока, обеспечивающего экологическую устойчивость природной системы речных бассейнов.

Можно определить предельно-допустимый уровень использования объема или расхода воды в речных бассейнах, т.е. можно определить предельно-допустимый уровень техногенной нагрузки на экологическую систему по следующим формулам:

$$W_n = W_p \cdot S(w) \cdot S(c),$$

$$Q_n = Q_p \cdot S(w) \cdot S(c),$$

где W_n , Q_n – предельно-допустимый уровень использования объема или расхода воды в речных бассейнах, км³ или м³/с; W_p , Q_p – объем или расход воды, формирующихся в речных бассейнах, км³ или м³/с.

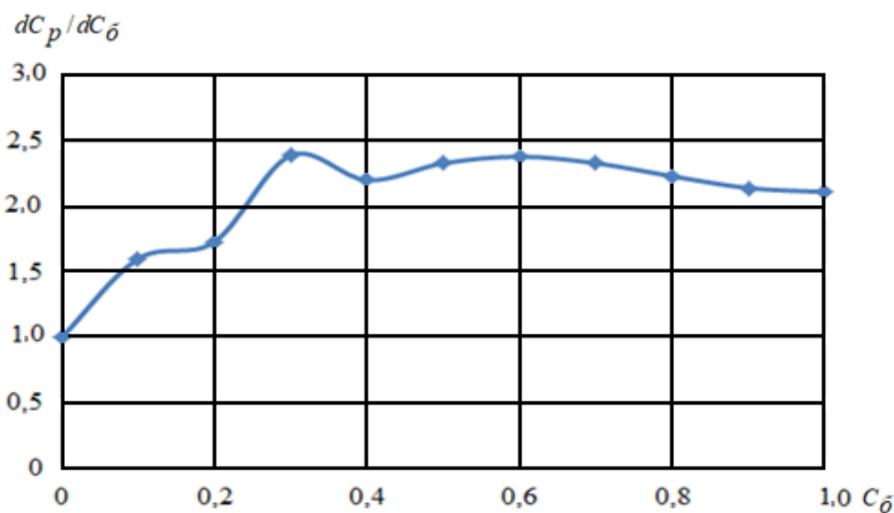


Рис. 2. График зависимости производной функции dC_p/dC_δ от концентрации загрязняющих веществ (C_δ) в р. Каратал.

Следовательно, на основе уравнения предельно-допустимого уровня использования объема или расхода воды в речных бассейнах, можно определить объем (W_3) и расход (Q_3) экологического стока, обеспечивающего экологическую устойчивость природной системы речных бассейнов:

$$W_3 = W_p \cdot [1 - S(w) \cdot S(c)],$$

$$Q_3 = Q_p \cdot [1 - S(w) \cdot S(c)].$$

На основе математической модели и средних годовых расходов воды различной обеспеченности р. Каратал в период 1932...2009 гг., выполнен прогнозный расчет экологического стока и безвозвратного водопотребления (табл. 4).

При расчете учитывались следующие положения: во-первых, рассматривался расчетный период в рамках «прошлое» (1932...1986 гг.) и «настоящее» (1987...2009 гг.) [1]. Во-вторых, для оценки изменения расхода воды использованы информационно-аналитические материалы гидрологических постов (с. Каратал, расположенное в предгорье Жетсуского Алатау и Наймансуек, расположенное в бассейне оз. Балхаш, на равнинной территории). Это позволяет разработать систему управления и регулирования водными ресурсами, обеспечивающими рациональное и эффективное использование для развития отраслей экономики в регионе.

Выводы. На основе уравнения гидрохимического баланса и однофакторных зависимостей, характеризующих относительную продуктивность водной полупогружной растительности от речного стока и концентрации загрязняющих веществ, разработана математическая модель для определения предельно-допустимой нагрузки в бассейне реки. Она включает прогнозирование концентрации загрязняющих веществ в бассейне р. Каратал, предельно-допустимый уровень безвозвратного водопотребления и экологический сток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. Внутренние и окраинные водоемы Казахстан (Арал, Балхаш, Каспий). – Алматы, 2012. – том IX. – книга 1. – 412 с.
2. Маркин В.Н. Определение экологически допустимого воздействия на малые реки // Мелиорация и водное хозяйство. – 2005. – №4. – С. 8-11.
3. Мустафаев Ж.С., Козыкеева А.Т., Жанымхан К. Методика определения экологически предельно-допустимого воздействия на малые реки // «Вода для жизни»: матер. междунар. научно-практической конф. – Алматы, 2016. – книга 2. – С. 187-294.
4. Мустафаев К.Ж., Козыкеева А.Т., Жанымхан К. Особенности формирования гидрогеохимического режима реки Каратал // Гидрометеорология и экология. – 2016. – №2. – С. 160-169.
5. Попов В.А. Математическое выражение закона лимитирующего фактора и его приложение к задачам мелиоративного земледелия // Мелиорация и водное хозяйство. – 1997. – №2. – С. 30-34.
6. Тарко А.М. Устойчивость биосферных процессов и принцип Лешателье // Доклад АН РФ. – 1995. – том 343. – №3. – С. 393-395.
7. Шабанов В.В. Влагодобеспеченность яровой пшеницы и ее расчет. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 142 с.

Поступила 10.10.2018

Техн. ғылымд. докторы Ж.С. Мұстафаев
Техн. ғылымд. докторы Ә.Т. Қозыкеева
Кұрманбек Жанымхан

ҚАРАТАЛ ӨЗЕНІНІҢ СУЖИНАУ АЛАБЫНЫҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ШЕКТЕЛГЕН-МҮМКІНШІЛІК ЖҮКТЕМЕСІН АНЫҚТАУ

Түйінді сөздер: өзеннің сужинау алабы, экология, су, заттар, ластану, мөлшер, өнімділік, гидрохимиялық теңгерменің теңдеуі, жүктеме, үлгі

Өзен алабының гидрохимиялық теңдеуінің және өзеннің ағынының және ластанған заттардың мөлшеріне байланыстыжартылай батқан су өсімдіктерінің өнімділігінің қатынастық шамасын сипаттайтын бірділелдемелі байланыстың негізінде, құрамында өзендегі судың заттармен ластану қойыртпағын бағдарлауға, суды тұтынудың шектелген-мүмкіншілік деңгейін және экологиялық ағынды анықтауға арналған, өзеннің сужинау алабының экологиялық тұрғыда шектелген-мүмкіншілік жүктемесінің математикалық үлгі құрылған және ол Қаратал өзенінің сужинау алабына түсірілетін табиғи-техногендік жүктеменің шектелген-мүмкіншілік шамасын анытау үшін пайдаланылған.

Zh.S. Mustafayev, A.T. Kozykeeva, Zhanykhan Kurmanbek

DETERMINATION OF ENVIRONMENTALLY PERMISSIBLE LOAD IN THE WATERS OF THE KARATAL RIVER BASIN

Key words: catchment of the river basin, ecology, water, matter, pollution, norm, productivity, equation of hydrochemical balance, load, model

Based on the equation of the hydrochemical balance of waters in river basins and the one-factor dependence that characterizes the relative productivity of aquatic semi-submerged vegetation from river runoff and the content of pollutants, a mathematical model has been developed for determining the ecologically maximum permissible load in catchment areas of the river basin including predicting the concentration of pollutants in the river, the maximum permissible level of irretrievable water consumption and ecological flow, which are realized, for I determine the maximum permissible level of natural and man-caused load in the Karatal river basin.