

УДК 552.482.2:577.4

Доктор техн. наук Ж.С. Мустафаев¹Доктор техн. наук А.Т. Козыкеева¹К. Жанымхан¹**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕКИ КАРАТАЛ**

Ключевые слова: модель, оценка, ресурсы, природа, сток, возвратные воды, водопотребление, загрязнение, соли, факторы

На основе существующих математических моделей продуктивности водной среды, позволяющих определить экологически допустимые пределы антропогенного воздействия, а также на основе принципа Ле-Шателье-Брауна, была разработана одна из модификаций математических моделей. Модель работает на базе уравнения гидрохимического баланса вещества в речных бассейнах; описывает поведение водной системы с учетом всех природных и антропогенных факторов, а также характеризует поведение водной экосистемы в состоянии устойчивого равновесия.

В настоящее время все водные объекты суши являются не только источниками водопотребления для промышленности, сельского и коммунально-бытового хозяйства, но и местом сброса отработанных сточных вод городов и различных отраслей экономики. В связи с этим возникает необходимость и важность изучения условий формирования и изменения гидрогеохимического режима малых рек. С одной стороны малые реки очень уязвимы за счет тесной связи формирования их стока с ландшафтом бассейна и постоянно увеличивающимися антропогенными нагрузками на него. С другой стороны малые реки широко распространены и важны для комфортного существования человека. При этом следует отметить, что на формирование гидрогеохимического режима малых рек оказывает влияние объем воды в реке и загрязненность речных бассейнов, так как их диапазон саморегулирования, в сравнении с большими реками, ограничен. Количественное истощение водных ресурсов малых рек наносит большой экологический и экономический ущерб природным и хозяйственным ком-

¹ Казахский Национальный аграрный университет, г. Алматы

плексам, нарушает устойчивость речных экосистем, затрудняет водопользование и ухудшает условия жизнедеятельности человека. В связи с этим, изучение влияния урбанизации и хозяйственной деятельности человека на гидроэкологический режим водных объектов является весьма актуальным в системе природопользования [11].

Для оценки экологически допустимого воздействия на малые реки разными авторами использовались различные подходы: М.Ж. Бурлибаев применял зависимости биопродуктивности травостоя пойменных лугов и воспроизводства рыбных запасов [1]; В.Н. Маркин использовал функции, на базе уравнения гидрохимического баланса веществ в речных бассейнах, которые описывают поведение водной системы [5]; В.В. Шабанов применял способ пропорциональных расходов речных бассейнов [4]. Многие исследователи используют гемостатическую кривую, разработанную Б. Фашевским [11], «диаграмму жизненного цикла речных бассейнов», опубликованную Ж.С. Мустафаевым и Л.Ж. Мустафаевой [7], «график зависимости эколого-экономической активности природной системы от интенсивности использования природных ресурсов», предложенный Ж.С. Мустафаевым, Л.Ж. Мустафаевой, К.Б. Койбагаровой и К.Ж. Мустафаевым [8], «коэффициент эколого-экономической активности общества при использовании природных ресурсов» К.Ж. Мустафаева [9].

Река Каратал – вторая по величине река в бассейне оз. Балхаш. Ее длина 390 км, площадь водосбора 19100 км², а площадь оледенения составляет 253,7 км². Она образуется при слиянии рек – Кора, Чижа, Текели и протекает по территории Алматинской области (рис. 1) [2].



Рис. 1. Бассейн р. Каратал.

По данным многолетних наблюдений, среднегодовой расход воды р. Каратал в створе г. Уштобе составляет $63,8 \text{ м}^3/\text{с}$, а в створе ур. Наймансуек – $69,4 \text{ м}^3/\text{с}$ (табл. 1) [6].

Таблица 1

Среднегодовое количество воды в бассейне р. Каратал, $\text{м}^3/\text{с}$

Месяц	р. Кора	р. Чижа	р. Каратал	
			г. Уштобе	ур. Наймансуек
1	3,07	3,25	36,6	37,8
2	2,89	3,10	39,5	39,2
3	3,32	4,02	62,2	68,6
4	7,22	12,7	80,0	88,1
5	15,3	28,1	103	108
6	30,4	32,5	128	130
7	35,2	21,8	85,9	102
8	25,7	11,8	44,0	57,0
9	9,74	6,63	36,0	41,0
10	5,12	5,61	51,2	55,0
11	4,09	4,53	54,5	59,0
12	3,36	3,79	44,4	47,5
Год	12,1	11,5	63,8	69,4

Таким образом, р. Каратал является питьевым источником и основной водной артерией крупного промышленного региона – Алматинской области. Исследуемая река относится к типу водных объектов, которые испытывают мощный «антропогенный пресс», связанный с истощением водных ресурсов в результате водозабора и их загрязнения. При такой экологической нагрузке на реку утрачивается средообразующая способность и экологическая устойчивость.

«Истощение вод» характеризуется уменьшением минимально допустимого стока поверхностных или подземных вод под влиянием изменения климата и водопотребления промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых объектов. Последние являются наиболее серьезным фактором при оценке экологического состояния водного объекта, поскольку именно уменьшение объема воды ниже предельного его значения, с точки зрения геоэкологии, и вызывает нарушение естественных жизненных процессов водного объекта.

По данным, измеренным на гидрохимических постах выше г. Тадыкорган и в пос. Екпенды, средняя минерализация воды в р. Каратал составляет $199 \text{ мг}/\text{дм}^3$, при жесткости $2,12 \text{ мг-экв}/\text{дм}^3$, рН воды равен 7,3. Преобладающими ионами в воде являются ионы гидрокарбонатов и кальция (НСО_3^- и Ca^{2+}), индекс воды по Алекину S_{Ca} (табл. 2, 3) [3].

Таблица 2

Состояние качества воды р. Каратал [3]

Створ	Индекс загрязнения воды		Содержание загрязняющих веществ, превышающих ПДК (2010 г.)		
	2009	2010	вещество	средняя концентрация, мг/дм ³	кратность превышения ПДК
г. Талдыкорган	0,89	4,25	медь	0,0207	20,7
			нитрат азота	0,031	1,55
пос. Екпенды	1,21	4,25	медь	0,0217	21,7
			нитрат азота	0,032	1,6

Таблица 3

Результаты анализа донных отложений р. Каратал (мг/кг) [3]

Вещество	Место отбора проб					
	г. Талдыкорган			пос. Екпенды		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Хром	0,07	0,09	0,23	0,08	0,08	0,145
Никель	1,6	12,5	15,65	0,89	12,8	13,43
Мышьяк	2,1	1,93	2,05	2,7	0,96	1,69
Марганец	0,2	0,67	0,97	0,5	1,28	1,04
Кадмий	1,6	1,92	2,3	0,87	1,95	1,16
Свинец	1,6	3,55	8,7	1,9	2,9	2,1
Медь	639,2	847,8	872,3	750,5	847,1	699,4

Как показывают данные табл. 2 и 3, гидрохимический состав воды очень сложный, в составе донных отложений встречаются соли и тяжелые металлы, которые оказывают влияние на продуктивность водной растительности. В связи с этим возникла необходимость разработать систему математических моделей, позволяющих прогнозировать экологическую устойчивость речных экосистем и предельно допустимый уровень использования водных ресурсов малых рек.

Оценка допустимого уровня воздействия на реки может быть сделана с помощью функции, позволяющей описать поведение водной системы, находящейся в состоянии устойчивого равновесия, с учетом влияния природных и техногенных факторов. Для этого рассмотрим средообразующие факторы р. Каратал, где в качестве функции, описывающей поведение водной системы, используем уравнение гидрологического и гидрохимического баланса вещества для среднемноголетних условий:

$$W_p = W_o + W_b - W_{bn} + W_{nz}, \quad (1)$$

$$G_p = G_{pn} + G_{\bar{o}} + G_b + G_n + G_{nz} - B, \quad (2)$$

где W_p – объем речного стока, W_b – объем возвратных вод, который определяется по формуле: $W_b = W_{bk} + W_{bno} + W_{bo}$, W_{bk} – объем возвратных вод городского коммунально-бытового хозяйства, W_{bno} – объем возвратных вод промышленных объектов, W_{bo} – объем коллекторно-дренажных вод с орошаемых земель; W_{bn} – объем водопотребления, $W_{\bar{o}}$ – объем воды, поступающей с водосборной площади, равен: $W_{\bar{o}} = g_{\bar{o}} \cdot F_{\bar{o}}$, $g_{\bar{o}}$ – модуль стока воды с водосборной площади, $F_{\bar{o}}$ – площадь водосбора; G_p – масса растворимых солей в гидрографической сети, определяемая по формуле: $G_p = W_p \cdot C_p$, C_p – концентрация вещества в речной воде; G_b – поступление массы растворимых солей с объемом возвратных (сточных) вод: $G_b = W_b \cdot C_b = W_{bk} \cdot C_{bk} + W_{bn} \cdot C_{bn} + W_{bo} \cdot C_{bo}$; C_b – концентрация вещества в возвратных водах; C_{bk} – концентрация вещества в возвратных водах городского коммунально-бытового хозяйства; C_{bn} – концентрация вещества в возвратных водах промышленных объектов; C_{bo} – концентрация вещества в коллекторно-дренажных водах; $G_{\bar{o}}$ – масса растворимых солей, поступающих с водосборной площади: $G_{\bar{o}} = g_{b\bar{o}} \cdot F_{\bar{o}}$, $g_{b\bar{o}}$ – удельный вынос вещества с единицы водосборной площади; G_{bn} – масса растворимых солей, забираемая при водопотреблении: $G_{bn} = W_{bn} \cdot C_p$; B – объем вещества, поглощенного водной растительностью; G_{nz} – поступление массы растворимых солей с подземными водами, определяется: $G_{nz} = W_{nz} \cdot C_{nz}$, C_{nz} – концентрация вещества в подземных водах; G_{pn} – поступление массы растворимых солей с русловыми потоками.

Объем вещества, поглощенного водной растительностью в бассейнах рек, зависит от объема воды в реке (W_p) и ее загрязненности (C_p), т.е. определяется из следующего уравнения: $B = B_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c)$, где B_{\max} – максимальный объем вещества, поглощенного водной растительностью: $B_{\max} = b_{\max} \cdot W_{\bar{o}}$, b_{\max} – максимальный объем вещества, поглощаемый водной растительностью из единицы объема воды; $S(w)$ – относительная продуктивность водной растительности, зависящая от объема воды в реке; $S(c)$ – относительная продуктивность водной растительности, зависящая от загрязненности воды в реке.

Для оценки гидрохимического режима стока речных бассейнов составляющие уравнения (1) и (2) представим в следующем виде:

$$W_p \cdot C_p = g_{b\bar{o}} \cdot F_{\bar{o}} + W_b \cdot C_b - W_{bn} \cdot C_p + W_{n3} \cdot C_{n3} - B_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c).$$

При этом объем возвратных вод можем представить в следующем виде:

$$W_b = K_b \cdot W_{bn} = K_{bk} \cdot W_{bk} + K_{bno} \cdot W_{bno} + K_{bo} \cdot W_{bo},$$

где K_b – коэффициент возвратных вод; K_{bk} – коэффициент возвратных вод городского коммунально-бытового хозяйства; K_{bno} – коэффициент возвратных вод промышленных объектов; K_{bo} – коэффициент возвратных вод с орошаемых земель.

С целью несколько упростить решаемые задачи, уравнение гидрохимического баланса вещества, представим в следующем виде:

$$W_p \cdot C_p = g_{b\bar{o}} \cdot F_{\bar{o}} + W_b \cdot C_b - W_{bn} \cdot C_p + W_{n3} \cdot C_{n3} - B_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c).$$

С учетом того, что $W_b = K_b \cdot W_{bn}$, уравнение гидрохимического баланса речных бассейнов можно записать в следующем виде:

$$W_p \cdot C_p = g_{b\bar{o}} \cdot F_{\bar{o}} + W_{bn} \cdot K_b \cdot C_b - W_{bn} \cdot C_p + W_{n3} \cdot C_{n3} - B_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c).$$

Если отношение объема речного стока (W_p) к бытовому стоку реки ($W_{\bar{o}}$) обозначим буквой A , тогда уравнение гидрохимического баланса речного бассейна примет следующий вид:

$$A \cdot C_p = \frac{g_{b\bar{o}} \cdot F_{\bar{o}}}{W_{\bar{o}}} + \frac{W_{bn} \cdot K_b \cdot C_b}{W_{\bar{o}}} - \frac{W_{bn} \cdot C_p}{W_{\bar{o}}} + \frac{W_{n3} \cdot C_{n3}}{W_{\bar{o}}} - \frac{B_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c)}{W_{\bar{o}}},$$

$$\text{или } A \cdot C_p = \frac{g_{b\bar{o}}}{g_{\bar{o}}} + \frac{W_{bn}}{g_{\bar{o}} \cdot F_{\bar{o}}} (K_b \cdot C_b - C_p) + \frac{W_{n3} \cdot C_{n3}}{g_{\bar{o}} \cdot F_{\bar{o}}} - \frac{B_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c)}{g_{\bar{o}} \cdot F_{\bar{o}}}.$$

После некоторых преобразований получим уравнение гидрохимического баланса вещества:

$$A \cdot C_p = \frac{g_{b\bar{o}}}{g_{\bar{o}}} + \frac{g_{bn}}{g_{\bar{o}}} (K_b \cdot C_b - C_p) + \frac{g_{n3} \cdot C_{n3}}{g_{\bar{o}}} - \frac{b_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c)}{g_{\bar{o}}},$$

$$\text{или } A \cdot C_p + \frac{g_{bn}}{g_{\bar{o}}} \cdot C_p = \frac{g_{b\bar{o}}}{g_{\bar{o}}} + \frac{g_{bn}}{g_{\bar{o}}} \cdot K_b \cdot C_b + \frac{g_{n3} \cdot C_{n3}}{g_{\bar{o}}} - \frac{b_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c)}{g_{\bar{o}}}.$$

Для оценки изменения концентрации речного стока, приведенное уравнение баланса вещества в речных бассейнах преобразуем:

$$C_p \left(A + \frac{g_{bn}}{g_{\bar{o}}} \right) = \frac{g_{b\bar{o}}}{g_{\bar{o}}} + \frac{g_{bn}}{g_{\bar{o}}} \cdot K_b \cdot C_b + \frac{g_{n3} \cdot C_{n3}}{g_{\bar{o}}} - \frac{b_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c)}{g_{\bar{o}}},$$

$$\text{или } C_p (A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bn}) = g_{b\bar{o}} + g_{bn} \cdot K_b \cdot C_b + g_n \cdot C_n - b_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c).$$

Преобразованное уравнение баланса вещества решим относительно C_p , тогда получим:

$$C_p = \frac{g_{b\bar{o}}}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bn})} + \frac{g_{bn} \cdot K_b \cdot C_b}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bn})} + \frac{g_n \cdot C_n}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bn})} - \frac{b_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c)}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bn})}.$$

Как видно из структуры уравнения баланса вещества, внешнее воздействие на речную экосистему характеризуется первыми тремя слагаемыми и с их помощью можно оценить концентрацию воды речных бассейнов в зависимости от уровня техногенного воздействия и антропогенной деятельности:

$$C_{pm} = \frac{g_{b\bar{o}}}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bn})} + \frac{g_{bn} \cdot K_b \cdot C_b}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bn})} + \frac{g_n \cdot C_n}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bn})},$$

где C_{pm} – концентрация воды речных бассейнов, сформировавшаяся под воздействием антропогенной деятельности. Следовательно, когда известна концентрация воды речных бассейнов в зависимости от уровня техногенного воздействия (C_{pm}), тогда можно определить концентрацию воды с учетом ее способности самоочищения:

$$C_p = C_{pm} - \frac{b_{\max} \cdot S(w) \cdot S(c)}{(A \cdot g_{\bar{o}} + g_{bn})}.$$

Функции $S(w)$ и $S(c)$ представляют собой однофакторные зависимости, имеющие вид куполообразных кривых, которые хорошо описываются уравнением В.В. Шабанова [12]:

$$S(w) = \left(\frac{w_i}{w_{opt}} \right)^{\gamma_w \cdot w_{opt}} \left(\frac{w_{\max} - w_i}{w_{\max} - w_{opt}} \right)^{\gamma_w \cdot (w_{\max} - w_{opt})};$$

$$S(c) = \left(\frac{C_i}{C_{opt}} \right)^{\gamma_c \cdot C_{opt}} \left(\frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max} - C_{opt}} \right)^{\gamma_c \cdot (C_{\max} - C_{opt})},$$

где w_{opt} – оптимальное значение объема воды в реке; w_{\max} – максимальное значение объема воды в реке; w_i – фактическое значение объема воды в реке; γ_w – параметр саморегулирования растений в водной среде; C_{opt} – оптимальное значение загрязненности речной воды; C_{\max} – максимальное значение загрязненности речной воды; C_i – фактическое значение загрязненности речной воды; γ_c – параметр саморегулирования растений в загрязненной среде.

Таким образом, с помощью разработанной модели продуктивности водной среды можно определить экологически допустимые пределы антропогенного воздействия, на основе принципа Ле-Шателье-Брауна. Согласно этому принципу, после любых изменений элементов естественной среды (вещественного состава, энергии, информации, скорости естественных процессов) обязательно развиваются цепные реакции, которые стараются нейтрализовать эти изменения или формирование новых природных систем, образование которых, при значительных изменениях среды, может принять необратимый характер [10].

Обсуждения результатов исследования. Для проверки диапазона применимости разработанной модификации математических моделей, для оценки степени экологически допустимого водозабора и сброса загрязненных сточных вод авторами проводился демонстрационный расчет. Для этого расчета были использованы следующие данные р. Каратал: максимальное значение объема воды в реке (w_{max}) – 4,21 км³; оптимальное значение объема воды в реке (w_{opt}) – 3,69 км³; фактическое значение объема воды в реке (w_i) – 2,28...4,21 км³; максимальная для растений концентрация веществ в реке (C_{max}) – 0,5 г/л; оптимальная для растений концентрация веществ в реке (C_{opt}) – 0,25 г/л; фактическая концентрация веществ в реке (C_i) – 0,418 г/л; параметр саморегулирования растений (γ) – 0,50. По полученным данным построены графики функций $S(w)$ и $S(c)$ зависящие от объема и загрязненности воды в р. Каратал (рис. 2). Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что характерным признаком кривых является их однообразие.

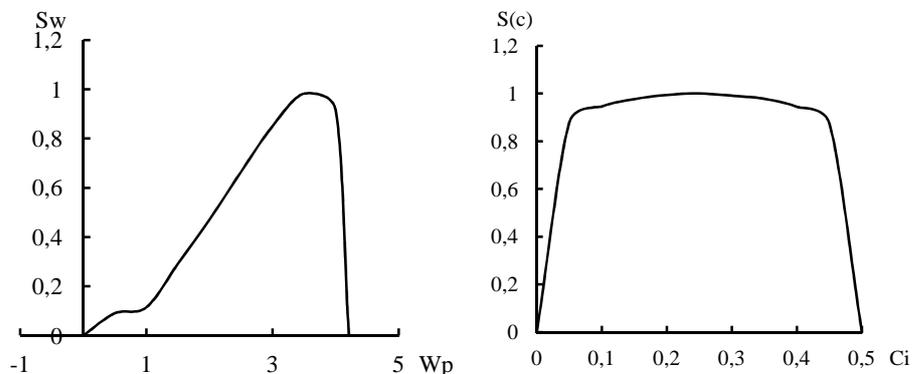


Рис. 2. Зависимость относительной продуктивности водной растительности от объема (а) и загрязненности (б) воды в р. Каратал.

Это еще раз подтверждает предположение о том, что различная по обеспеченности продуктивность водной растительности зависит от вод-

ных ресурсов р. Каратал. Требования к водным условиям для максимальной продуктивности растительности являются генотипическим признаком.

Вторым признаком является то, что существующая загрязненность воды р. Каратал, еще находится в пределах саморегуляции водной растительностью. Поэтому диапазон допустимых значений загрязнения располагается в пределах точек перегиба, которые в свою очередь полностью определяются положением точек перегиба кривых $S(c)$.

Используя полученные данные, можно построить совместный график функции $S(w)$ и $S(c)$, зависящий от объемов воды в р. Каратал и ее загрязненности. Этот график позволит оценить степень экологически допустимого водозабора из реки и сброса в нее загрязненных сточных вод.

Выводы. Природная речная вода является транспортным средством для перераспределения химических элементов между биогеоценозами. В них постоянно происходят химические реакции, т.е. саморегуляция водной растительности. Это необходимо учитывать при определении экологически допустимого водозабора и загрязнении речных бассейнов малых рек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлибаев М.Ж. Теоретические основы устойчивости экосистем транзональных рек Казахстана. – Алматы: Канагат, 2007. – 516 с.
2. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. Ресурсы речного стока Казахстана. – Алматы, 2012. – Том VII. – книга 2. – 320 с.
3. Информационный бюллетень о состоянии окружающей среды бассейна озера Балхаш. – Алматы, 2010. – Вып. 4(15). – 50 с.
4. Комплексное использование водных ресурсов и охрана природы / Под ред. В.В. Шабанова. – М.: Колос, 1990. – 360 с.
5. Маркин В.Н. Определение экологически допустимого воздействия на малые реки // Мелиорация и водное хозяйство. – 2005. – №4. – С. 8-11.
6. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши (1990–2002). – Алматы: РГП «Казгидромет». – Том 5. – Вып. 4. – 259 с.
7. Мустафаев Ж.С., Мустафаева Л.Ж. Методологические основы экономико-экологической эффективности использования водно-земельных ресурсов // Повышение эффективности системы сельскохозяйственного водопользования: Матер. Республ. научно-практической конференции, Алматы. – С. 198-204.
8. Мустафаев Ж.С., Мустафаева Л.Ж., Койбагаров К.Б., Мустафаев К.Ж. Методология оценки эколого-экономической эффективности природообустройства агроландшафтов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – Барнаул, 2007. – №6(32). – С. 24-28.

9. Мустафаев К.Ж. Методологические основы экологической оценки емкости природных систем. – Тараз, 2014. – 316 с.
10. Тарко А.М. Устойчивость биосферных процессов и принцип Ле-Шателье // Доклад АН РФ. – 1995. – Том 343. – №3. – С. 393-395.
11. Фащевский Б.В. Экологическое обоснование допустимой степени регулирования речного стока. – Минск: БелНИИИТИ, 1989. – 186 с.
12. Шабанов В.В. Влагообеспеченность яровой пшеницы и ее расчет. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 141 с.

Поступила 18.05.2016

Техн. ғылымд. докторы	Ж.С. Мустафаев
Техн. ғылымд. докторы	А.Т. Козыкеева
	К. Жанымхан

ҚАРАТАЛ ӨЗЕНДЕРДІҢ ГИДРОХИМИЯЛЫҚ ТӘРТІБІНІҢ ҚАЛЫПТАСУ ЕРЕКШЕЛІГІ

Түйін сөздер: модель, бағалау, ресурстар, табиғат, ағын, суды қайтарусыз, суды пайдалану, ластану, тұз, факторлар

Қазіргі кездердегі Ле-Шателье-Браун қағидасына негізделген су ортасының өнімділігі арқылы табиғи-техногендік әсердің экологиялық щектелген шамасын анықтауға мүмкіншілік беретін математикалық үлгілерді пайдалана отырып, оның жетілдірілген жүйелік түрін құру үшін, су жүйесінің табиғи және техногендік әсерлерін толық ескере отырып, өзен алабының гидрохимиялық теңгермелік теңдеуінің негізінде су экожүйесін сипаттайтын және экологиялық орнықтылықта болатын математикалық үлгінің жүйесі құрылды.

ZH.S. Mustafayev, A.T. Kozykееva, K. Zhaniymhan

FEATURES OF KARATAL RIVER HYDROCHEMICAL REGIME FORMATION

Keywords: model, assessment, resources, nature, flow, return water, water consumption, pollution, salt, factors

On the basis of the existing mathematical models of aquatic productivity, allowing to define environmentally acceptable limits of human impact, as well as on the principle of Le Chatelier-Brown, one of the versions of mathematical models has been developed. The model is based on the equation of hydrochemical balance of substances in river basins; It describes the behavior of the water system with all the natural and anthropogenic factors, and characterizes the behavior of the aquatic ecosystem in the state of stable equilibrium.