

УДК 504.05:556.53

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД РЕЧНОГО БАССЕЙНА С МАТЕМАТИЧЕСКИМ АНАЛИЗОМ (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ИЛЕ)

Ж.С. Мустафаев¹ д.т.н., Л.М. Рыскулбекова¹

¹Казахский Национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан
E-mail: z-mustafa@rambler.ru

На основе структурного анализа комплексных гидрохимических индексов оценки загрязнения поверхностных вод, используемых в различных речных бассейнах, и законов лимитирующих факторов получена математическая модель в виде коэффициента предельно-допустимой загрязненности воды (K_{ndzi}), представляющей произведение коэффициента водности (K_b) и предельной загрязненности воды (K_{nzi}). Результаты моделирования, вместе с индексом загрязненности воды (ИЗВ), использованы для геоэкологической оценки качества поверхностных вод бассейна реки Иле в пространственно-временном масштабе с учетом нормативных критериев предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ для водоемов рыбохозяйственного назначения, которые показали, что между коэффициентом предельно допустимой загрязненности воды (K_{ndzi}) и индексом загрязненности воды (ИЗВ) имеется ярко выраженная связь, которая описывается логарифмическим уравнением, и позволяющая использовать данные характеристики для оценки экологического состояния водных объектов. Оценка качества воды проведена для четырёх гидрологических створов водосборного бассейна реки Иле, которая показала, что загрязнение воды носит трансграничный характер, так как на гидрологическом посту Добын, расположенному на границах Республики Казахстан и Китайской Народной Республики, качество воды оценивается как «загрязненная», а от Капшагайского водохранилища до озера Балхаш – «умеренно загрязненная», где за счет самоочищающейся способности водной экосистемы и вод, поступающих от притоков, происходит некоторое улучшение качества воды.

Ключевые слова: бассейн реки, гидрохимические показатели, загрязнение, оценка качества воды, метод, анализ, свойства природных процессов

Поступила 26.10.21

DOI:10.54668/2789-6323-2021-103-4-6-19

ВВЕДЕНИЕ

Водосборная территория речных бассейнов представляет собой многокомпонентные геосистемы имеющие единство гидрогеохимических потоков, выполняющие важные средообразующие и экологические функции и являющиеся пространственными базисами природопользования и природообустройства с разнообразными целями использования, в рамках которых открывается возможность комплексной оценки состояния водных объектов. Для осуществления

количественной и качественной оценки деятельности на водосборных территориях речных бассейнов с использованием разнообразных принципов и методов необходимы многолетние систематизированные объективные гидрологические, гидрогеохимические и хозяйственные информационно-аналитические материалы. При этом научная и практическая целесообразность этой проблемы определяется еще и тем, что от правильного выбранного принципа и метода во многом зависит обоснованность и достоверность прогнозов геоэкологического состояния

водосборных территорий речных бассейнов, которые требуют необходимости структурного анализа комплексных гидрохимических индексов оценки загрязнения поверхностных вод, на основе законов природы, принципов и свойств природных процессов. Решению этой задачи способствует система мониторинга, данные которого служат информационно-аналитической основой для принятия управленческих решений по водохозяйственной деятельности, управления качеством водных ресурсов, прогнозирования экологического состояния и оценки влияния на них антропогенной деятельности.

Объект исследования – водосборная территория бассейна реки Иле, являющейся основной водной артерией бассейна озера Балкаш. Река Иле берет начало на ледниках Музарт в Центральном Таниртау на горном хребте в Кыргызстане и частично Казахстане, ее истоком является река Текес, затем течет по территории КНР, где сливается с реками Кунес и Каш, затем снова входит в пределы Республики Казахстан и на 1001-м км впадает в озеро Балкаш. Общая длина реки составляет 1439 км, а в пределах Республики Казахстан – 815 км. Площадь водосборной территории бассейна реки Иле на территории Казахстана составляет 77400 км², стокоформирующая часть бассейна расположена на территории Китайской Народной Республики (густота сети – от 0,6 до 3 км/км²) [3, 6].

Цель исследований – для повышения точности и надежности определения норматива предельно-допустимой концентрации загрязняющих веществ в водотоках выполнена разработка их математических моделей, основанных на учете водности и законов нелинейности природных процессов и методов построения логистической регрессивной нелинейной системы уравнений на основе принципов природных

$$ИЗВ = \frac{1}{6} \cdot \sum \frac{C_{i-6}}{ПДК_{i-6}}, \quad (1)$$

где n – строго лимитируемое количество показателей (ингредиентов), берущихся для расчета, имеющих наибольшее значение, независимо от того, превышают они $ПДК_i$ или нет, включая показатель растворенного кислорода $БПК_5$. Для поверхностных вод суши $n = 6$; C_i – концентрация i -го загрязняющего вещества в воде; $ПДК_i$ –

аналогий и интеграций знаний.

Необходимость постановки и решения данной задачи возникает в связи с тем, что практическая потребность оценки степени загрязнения водных ресурсов в условиях антропогенной деятельности обуславливает рассмотрение их уровня организации, как сложной динамической саморегулируемой системы.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Программы мониторинга качества воды стали наиболее важными для разработки четкого понимания процессов качества воды для лиц, принимающих решения, для понимания, интерпретации и использования этой информации при разработке стратегий сохранения водных ресурсов в мире, что стало предпосылкой для совершенствования методики определения индекса загрязнения [14, 17], использования энтропии Шеннона [10, 15] в качестве инструмента для разработки энтропийно-взвешенного индекса качества воды (EWQI) [13]. Также показаны возможности широкого использования индекса качества воды (WQI) [12, 16], как метода оценки качества воды для различных речных бассейнах по всему миру.

Существует большое количество работ, среди которых одним из наиболее распространенных комплексных показателей качества воды является гидрохимический индекс загрязнения воды (ИЗВ) [4], в качестве интегральной характеристики загрязненности поверхностных вод используются классы качества воды, которые для поверхностных вод проводятся только по строго ограниченному количеству ингредиентов по формуле:

предельно допустимая концентрация i -го загрязняющего вещества.

Определение индекса загрязненности воды (ИЗВ*), которое осуществляют путем умножения коэффициента водности ($K = Q_{факт} / Q_{ср.мн.}$) на рассчитанный индекс загрязненности воды (ИЗВ), производится по следующей формуле [11]:

$$ИЗВ^* = ИЗВ \cdot K = \frac{1}{n} \sum_i \frac{C_i}{ПДК_i} \cdot \frac{Q_{факт}}{Q_{ср.мн.}} \quad (2)$$

где C_i – фактическая концентрация i -го ингредиента; $ПДК_i$ – предельно-допустимая концентрация ингредиента, соответствующая назначению водного объекта; $Q_{факт}$ – фактический расход воды ($м^3/с$); $Q_{ср.мн.}$ – среднемноголетний расход воды ($м^3/с$); – количество ингредиентов, по которым осуществлялся расчет.

Предельно-допустимая концентрация

$$ПДК_i = C_{\phi} / C_n \quad (3)$$

где C_n – предельно допустимая концентрация загрязняющих веществ; C_{ϕ} – фоновые концентрации химических веществ в водотоках.

Лимитирующий показатель вредности (ЛПВ) – показатель, характеризующийся наибольшей безвредной концентрацией в воде, ко-

$$\sum_i^N \frac{C_i}{ПДК_i} \leq 1,0 \quad (4)$$

где C_i – концентрация веществ в воде водоема, фактическая или расчетная (для проектируемых выпусков), $мг/л$; $ПДК_i$ – предельно-допустимая концентрация того же вещества, $мг/л$; N – общее число веществ одного ЛПВ, присутствующих в воде водоема.

Таким образом, все увеличивающиеся количество методов оценок качества поверхностных вод речных бассейнов, растущее разнообразие принципов и способов их построения требует всестороннего структурного и системного анализа на их соответствие законам природы и природных процессов.

Исследование основано на применении аппарата математического моделирования качества поверхностных вод, предусматривающего использование классических подходов (с ис-

пользованием уравнения масса переноса и статистических методов обработки информации), и современного опыта создания и исследования моделей оценки качества поверхностных вод водных объектов.

пользованием уравнения масса переноса и статистических методов обработки информации), и современного опыта создания и исследования моделей оценки качества поверхностных вод водных объектов.

При решении поставленных задач исследования использованы многолетние информационно-аналитические материалы «Ежегодные данные о качества поверхностных вод Республики Казахстан» республиканского государственного предприятия (РГП) «Казгидромет» и «Балкаш-Алакольской бассейновой инспекции по регулированию использования и охраны водных ресурсов» Комитета по водным ресурсам Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан (табл. 1).

При решении поставленных задач исследования использованы многолетние информационно-аналитические материалы «Ежегодные данные о качества поверхностных вод Республики Казахстан» республиканского государственного предприятия (РГП) «Казгидромет» и «Балкаш-Алакольской бассейновой инспекции по регулированию использования и охраны водных ресурсов» Комитета по водным ресурсам Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан (табл. 1).

Таблица 1

Концентрации загрязняющих веществ в речной воде на водосборе бассейна реки Или в пространственно-временном масштабе

Показатель	Средние концентрации загрязняющих веществ за период, год					
	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Река Иле – в створе гидропоста пристань Добын						
Расход воды (Q), $м^3/с$	409	370	480	595	398	470
Взвешенные вещества, $мг/л$	751,6	123,3	49,2	88,56	117,9	132,1
Азот аммонийный (NH_4), $мг/л$	0,100	0,11	0,060	0,063	0,060	0,064
Азот нитритный (NO_2), $мг/л$	0,010	0,03	0,06	0,067	0,074	0,034
Азот нитратный (NO_3), $мг/л$	1,000	0,87	0,72	1,201	1,125	1,040
Нефтепродукты, $мг/л$	0,060	0,07	0,03	0,025	0,035	0,041
Хлориды (Cl), $мг/л$	8,870	6,550	12,86	13,12	13,25	13,52
Сульфаты (SO_4), $мг/л$	76,70	77,06	62,38	42,75	55,04	57,01
Железо общее (Fe), $мг/л$	0,180	0,300	0,340	0,233	0,300	0,300

Показатель	Средние концентрации загрязняющих веществ за период, год					
	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Медь (Cu), мг/л	3,33	14,52	7,10	7,278	7,360	7,520
Цинк (Zn), мг/л	5,00	22,46	4,00	2,005	2,546	3,008
Река Иле – в створе гидропоста выше 164 км Капшагайской ГЭС						
Расход воды (Q), м ³ /с	454,0	433,0	521,0	750,0	447,0	388,0
Взвешенные вещества, мг/л	–	120,6	69,0	–	–	–
Азот аммонийный (NH ₄), мг/л	0,063	0,070	0,110	0,127	0,134	0,138
Азот нитритный (NO ₂), мг/л	0,011	0,03	0,02	0,020	0,025	0,030
Азот нитратный (NO ₃), мг/л	1,080	0,94	0,89	0,599	0,900	1,170
Нефтепродукты, мг/л	0,043	0,05	0,03	0,011	0,021	0,017
Хлориды (Cl), мг/л	9,900	7,31	11,80	23,60	20,52	25,31
Сульфаты (SO ₄), мг/л	80,53	80,91	79,43	103,3	86,08	95,97
Железо общее (Fe), мг/л	0,084	0,14	0,14	0,074	0,130	0,140
Медь (Cu), мг/л	1,449	6,32	8,08	7,78	6,950	5,913
Цинк (Zn), мг/л	3,105	13,95	1,95	1,763	2,595	2,854
Река Иле – в створе гидропоста Капчагай 26 км ниже ГЭС						
Расход воды (Q), м ³ /с	451	526	533	718	362	572
Взвешенные вещества, мг/л	20,6	40,0	14,2	–	–	–
Азот аммонийный (NH ₄), мг/л	0,05	0,08	0,09	0,009	0,140	0,270
Азот нитритный (NO ₂), мг/л	0,01	0,01	0,01	0,005	0,010	0,015
Азот нитратный (NO ₃), мг/л	0,56	0,81	2,14	0,573	1,146	1,490
Нефтепродукты, мг/л	0,150	0,050	0,020	0,009	0,014	0,020
Хлориды (Cl), мг/л	35,03	5,65	70,31	87,88	96,67	104,4
Сульфаты (SO ₄), мг/л	98,34	78,0	70,28	79,42	88,94	93,18
Железо общее (Fe), мг/л	0,11	0,05	0,13	0,065	0,030	0,045
Медь (Cu), мг/л	1,75	4,36	5,030	5,028	5,123	5,252
Цинк (Zn), мг/л	3,63	8,11	3,19	2,468	3,208	3,401
Река Иле – в створе гидропоста – село Ушжарма						
Расход воды (Q), м ³ /с	451	552	539	598	493	472
Взвешенные вещества, мг/л	40,4	34,9	33,0	–	–	–
Азот аммонийный (NH ₄), мг/л	0,03	0,05	0,06	0,08	0,101	0,113
Азот нитритный (NO ₂), мг/л	0,020	0,010	0,010	0,020	0,023	0,025
Азот нитратный (NO ₃), мг/л	0,460	0,850	0,670	0,824	0,865	0,952
Нефтепродукты, мг/л	0,17	0,07	0,02	0,007	0,030	0,060
Хлориды (Cl), мг/л	30,28	8,26	12,21	18,32	21,37	24,42
Сульфаты (SO ₄), мг/л	88,84	78,02	82,13	87,73	86,24	90,34
Железо общее (Fe), мг/л	0,09	0,05	0,05	0,068	0,073	0,072
Медь (Cu), мг/л	1,00	3,96	7,26	7,52	7,78	7,41
Цинк (Zn), мг/л	6,67	14,15	1,95	1,933	2,050	2,071

Таким образом, при геоэкологической оценке качества поверхностных вод в водосборах бассейна реки Иле в качестве потенциально важных предикторов в базу данных включены азот аммонийный (NH₄), азот нитритный (NO₂), азот нитратный (NO₃), хлориды (Cl), сульфаты (SO₄), медь (Cu), цинк (Zn), железо общее (Fe), характеризующих качества поверхностных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Закон лимитирующего (ограничивающего) фактора или закон минимума Либиха – один из фундаментальных законов в экологии, гласящий, что наиболее значим для организма тот фактор, который более всего отклоняется от оптимального его значения и позволяющий определить лимитирующий признак вредного

действия на организм человека качества воды в водосборах речного бассейна [7].

Нормирование веществ по лимитирующему признаку вредного действия на организма человека в условиях антропогенного загрязнения водных объектов можно определить по двум признакам, то есть по совокупности коэффициента водности K_b , как отношение фактического расхода воды (Q_p , м³/с) к среднемуголет-

нему расходу воды (Q_{cp} , м³/с) и коэффициента предельной загрязненности (K_{nz}) или индекса загрязненности воды (ИЗВ), который рассчитывается как сумма приведенных к ПДК_i фактических значений основных показателей качества воды (C_i).

Индекс загрязнения воды широко используется в мировой практике в качестве интегрального показателя качества воды [5]:

$$ИЗВ = \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{C_i}{ПДК_i} \quad (5)$$

При этом, характеристику загрязненности, то есть коэффициента предельной загрязненности воды несколькими веществами (N) через показатель кратности сверхнормативного

загрязнения K_{nzi} (индекс загрязненности воды минус 1), который определяется как среднее по отдельным (i -м) рассматриваемым веществам, рассчитывают по следующему выражению [9]:

$$K_{nzi} = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \left(\frac{C_i}{ПДК_i} - 1 \right) = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{C_i}{ПДК_i} - 1 = ИЗВ - 1 \quad (6)$$

Соответственно закону лимитирующего фактора коэффициент предельно-допустимой

загрязненности воды может быть выражен следующей математической зависимостью:

$$K_{ndzi} = K_{bi} \cdot K_{nzi}, \quad 1 \geq K_b \geq 0, \quad 1 \geq K_{nzi} \geq 0 \quad (7)$$

При этом концентрация веществ в воде водоема или речных бассейнов прямо зависит от массы вещества (MB), поступающей ежегодно в русла речных бассейнов и обратно от фактического расхода воды, и показывает, что между коэффициентом водности и коэффициентом предельно-допустимой загрязненности существует прямая линейная зависимость.

Водосборы речных бассейнов, как элементы геосистемы, обладают общесистемными свойствами. Нелинейность природных процессов, где трансформация и обмен энергий и веществом идет всегда с замедляющей скоростью, показывает, что интенсивность вредного действия на живой организм в условиях увеличения

антропогенного загрязнения водных объектов замедляется за счет адаптации, то есть степень вредного воздействия пропорциональна произведению концентрации вещества в воде речных бассейнов.

Построение любой модели в той или иной мере связано с упрощением действительности, что обуславливает наличие ограничений области ее применения и, в то же время, дает возможность получения достоверных результатов, то есть на основе этого допущения, изменение коэффициента предельной загрязненности воды, от приведенного индекса загрязненности воды приближенно описывается уравнением:

$$\frac{dK_{nzi}}{dИЗВ} = k \cdot (K_{nzi}) \quad (8)$$

Решение этого уравнения определяется выбором аналитического выражения $k \cdot (K_{nzi})$, широко распространенного в практике гидрохимических расчетов, с учетом нелинейности

природных процессов при оценке вредного воздействия качества воды на живой организм, которое описывается экспоненциальной функцией, имеющей следующий вид:

$$K_{nzi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [1 - \exp(-ИЗВ)] \quad (9)$$

Таким образом, коэффициент предельно-допустимой загрязненности воды (K_{ndzi}) можно представить как произведение коэффициента

водности (k_b) и коэффициента предельной загрязненности воды (K_{nzi}). Уравнение имеет следующий вид:

$$K_{ndzi} = K_b \cdot K_{nzi} = \left(\frac{Q_{cp}}{Q_i} \right) \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [1 - \exp(-ИЗВ)] \quad (10)$$

При этом, математическая модель для определения коэффициента предельно-допустимой загрязненности воды имеет ряд преимуществ, то есть, во-первых, учитывает один из главных свойств геосистемы – нелинейность природных процессов, во-вторых, дает возможность оценки качества через показатель *ИЗВ*, в-третьих, имеет генетическое сходство с индексом Шеннона, который заимствован из теории информации и представляет собой параметр оценки сложности и содержания информации любых типов систем, в-четвертых, позволяет уточнить границу загрязнения предельно-допустимой концентрации загрязняющих веществ и, в-пятых, учитывает водность водосбора речных бассейнов.

ОБСУЖДЕНИЕ

На основе многолетних информационно-аналитических материалов, характеризующих формирования гидрохимического режима на водосборных территориях бассейна реки Иле в пространственно-временном масштабе, а также и с использованием индекса загрязненности

воды и коэффициента предельно-допустимой загрязненности воды выполнен сравнительный прогнозный расчет качества воды для оценки их надежности и генетического сходства (табл. 2).

При выполнении сравнительного прогнозного расчета для оценки качества воды по гидрохимическим показателям использованы количественные значения *ПДК_i* для рыбохозяйственной оценки поверхностных вод речных бассейнов [3].

Оценка качества воды проведена для четырёх гидрологических створов в водосборных бассейнах реки Иле показала, что загрязнение воды носит трансграничный характер, так как на гидрологическом посту Добын, расположенного на границе Республики Казахстан и Китайской Народной Республики качество воды относится к классу «загрязненная» (IV), а от Капшагайского водохранилища до озера Балкаш к классу «умеренно загрязненная» (III), где за счет самоочищающейся способности водной экосистемы и вод, поступающих с притоков, происходит некоторое улучшение качества воды.

Таблица 2

Оценка качества воды на водосборных территориях бассейна реки Иле по гидрохимическим показателям в пространственно-временном масштабе и с использованием индекса загрязненности воды и коэффициента предельно-допустимой загрязненности воды

Показатели	<i>ПДК_i</i>	Годы					
		1995	2000	2005	2010	2015	2019
Река Иле – в створе гидропоста – пристань Добын							
Индекс загрязненности воды (<i>ИЗВ</i>)							
Азот аммонийный (<i>NH₄</i>), мг/л	0,39	0,256	0,282	0,154	0,469	0,825	0,843
Азот нитритный (<i>NO₂</i>), мг/л	0,02	5,000	5,500	3,000	3,150	3,000	3,200
Азот нитратный (<i>NO₃</i>), мг/л	9,00	0,111	0,097	0,080	0,133	0,125	0,116
Нефтепродукты, мг/л	0,05	1,200	1,400	0,600	0,050	0,700	0,820
Хлориды (<i>Cl</i>), мг/л	300,0	0,030	0,022	0,043	0,043	0,044	0,045
Сульфаты (<i>SO₄</i>), мг/л	100,0	0,767	0,771	0,624	0,428	0,550	0,570
Железо общее (<i>Fe</i>), мг/л	0,030	6,000	10,00	11,33	7,776	10,00	10,00
Медь (<i>Cu</i>), мг/л	1,000	3,330	14,52	7,100	7,578	7,360	7,520
Цинк (<i>Zn</i>), мг/л	10,00	0,500	2,246	0,400	0,200	0,254	0,301
<i>ИЗВ</i>		1,909	3,870	2,592	2,155	2,539	2,508
Класс качества воды		III	IV	IV	IV	IV	IV
Коэффициент предельно-допустимой загрязненности воды <i>K_{ндзи}</i>							
Азот аммонийный (<i>NH₄</i>), мг/л	0,39	0,226	0,246	0,143	0,375	0,562	0,570
Азот нитритный (<i>NO₂</i>), мг/л	0,02	0,993	0,996	0,951	0,957	0,951	0,951
Азот нитратный (<i>NO₃</i>), мг/л	9,00	0,106	0,093	0,073	0,125	0,118	0,110
Нефтепродукты, мг/л	0,05	0,699	0,754	0,451	0,049	0,504	0,560
Хлориды (<i>Cl</i>), мг/л	300,0	0,026	0,022	0,042	0,043	0,043	0,044

Показатели	ПДК _i	Годы					
		1995	2000	2005	2010	2015	2019
Сульфаты (SO ₄), мг/л	100,0	0,536	0,538	0,465	0,348	0,424	0,435
Железо общее (Fe), мг/л	0,030	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
Медь (Cu), мг/л	1,000	0,964	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
Цинк (Zn), мг/л	10,00	0,394	0,895	0,330	0,182	0,225	0,260
K _{нзи}		0,549	0,616	0,496	0,453	0,536	0,553
K _{ндзи} = k _b · K _{нзи}		0,615	0,758	0,471	0,294	0,611	0,536
Река Иле – в створе гидропоста 164 км выше Капшагайской ГЭС							
Индекс загрязненности воды (ИЗВ)							
Азот аммонийный (NH ₄), мг/л	0,39	0,161	0,179	0,282	0,325	0,343	0,353
Азот нитритный (NO ₂), мг/л	0,02	0,550	1,500	1,000	1,000	1,250	1,500
Азот нитратный (NO ₃), мг/л	9,00	0,120	0,104	0,098	0,067	0,100	0,119
Нефтепродукты, мг/л	0,05	0,860	1,000	0,600	0,220	0,420	0,340
Хлориды (Cl), мг/л	300,0	0,034	0,024	0,039	0,079	0,068	0,084
Сульфаты (SO ₄), мг/л	100,0	0,805	0,081	0,793	1,033	0,861	0,960
Железо общее (Fe), мг/л	0,030	2,800	4,666	4,666	2,466	4,333	4,666
Медь (Cu), мг/л	1,000	1,449	6,320	8,080	7,780	6,950	5,913
Цинк (Zn), мг/л	10,00	0,311	1,395	0,195	0,176	0,259	0,284
ИЗВ		0,788	1,696	1,750	1,460	1,620	1,580
Класс качества воды		II	III	III	III	III	III
Коэффициент предельно-допустимой загрязненности воды K _{ндзи}							
Азот аммонийный (NH ₄), мг/л	0,39	0,149	0,164	0,246	0,278	0,291	0,297
Азот нитритный (NO ₂), мг/л	0,02	0,424	0,777	0,632	0,632	0,714	0,777
Азот нитратный (NO ₃), мг/л	9,00	0,113	0,099	0,093	0,065	0,095	0,112
Нефтепродукты, мг/л	0,05	0,004	0,632	0,451	0,197	0,343	0,288
Хлориды (Cl), мг/л	300,0	0,553	0,024	0,038	0,076	0,066	0,081
Сульфаты (SO ₄), мг/л	100,0	0,939	0,078	0,548	0,644	0,577	0,617
Железо общее (Fe), мг/л	0,030	0,766	0,991	0,991	0,915	0,987	0,991
Медь (Cu), мг/л	1,000	0,267	0,998	0,999	0,999	0,999	0,997
Цинк (Zn), мг/л	10,00	0,646	0,752	0,177	0,161	0,228	0,248
K _{нзи}		0,418	0,501	0,464	0,443	0,478	0,490
K _{ндзи} = k _b · K _{нзи}		0,459	0,576	0,445	0,294	0,535	0,632
Река Иле – в створе гидропоста Капчагай 26 км ниже ГЭС							
Индекс загрязненности воды (ИЗВ)							
Азот аммонийный (NH ₄), мг/л	0,39	0,128	0,205	0,231	0,231	0,359	0,690
Азот нитритный (NO ₂), мг/л	0,02	0,500	0,500	0,500	0,250	0,500	0,750
Азот нитратный (NO ₃), мг/л	9,00	0,062	0,090	0,238	0,064	0,127	0,166
Нефтепродукты, мг/л	0,050	3,000	1,000	0,400	0,180	0,280	0,400
Хлориды (Cl), мг/л	300,0	0,117	0,019	0,234	0,293	0,322	0,348
Сульфаты (SO ₄), мг/л	100,0	0,983	0,780	0,703	0,794	0,879	0,932
Железо общее (Fe), мг/л	0,030	3,667	1,167	4,333	2,166	1,000	1,500
Медь (Cu), мг/л	1,000	1,750	4,360	5,030	5,028	5,123	5,252
Цинк (Zn), мг/л	10,00	0,363	0,811	0,319	0,247	0,321	0,340
ИЗВ		1,174	0,992	1,332	1,139	0,990	1,153
Класс качества воды		III	III	III	III	III	III
Коэффициент предельно-допустимой загрязненности воды K _{ндзи}							
Азот аммонийный (NH ₄), мг/л	0,39	0,120	0,196	0,206	0,206	0,302	0,498

Показатели	ПДК _i	Годы					
		1995	2000	2005	2010	2015	2019
Азот нитритный (NO ₂), мг/л	0,02	0,394	0,394	0,394	0,220	0,394	0,528
Азот нитратный (NO ₃), мг/л	9,00	0,060	0,086	0,212	0,062	0,119	0,153
Нефтепродукты, мг/л	0,05	0,950	0,632	0,330	0,165	0,244	0,330
Хлориды (Cl), мг/л	300,0	0,011	0,019	0,209	0,254	0,276	0,393
Сульфаты (SO ₄), мг/л	100,0	0,626	0,542	0,515	0,548	0,585	0,606
Железо общее (Fe), мг/л	0,030	0,974	0,689	0,987	0,885	0,632	0,770
Медь (Cu), мг/л	1,000	0,826	0,987	0,993	0,994	0,994	0,995
Цинк (Zn), мг/л	10,00	0,304	0,556	0,273	0,219	0,275	0,288
K _{нзи}		0,485	0,455	0,457	0,395	0,425	0,496
K _{ндзи} = k _b · K _{нзи}		0,567	0,455	0,452	0,288	0,621	0,456
Река Иле – в створе гидропоста село Ушжарма							
Индекс загрязненности воды (ИЗВ)							
Азот аммонийный (NH ₄), мг/л	0,39	0,077	0,128	0,153	0,205	0,259	0,289
Азот нитритный (NO ₂), мг/л	0,02	1,000	0,500	0,500	1,000	1,150	1,250
Азот нитратный (NO ₃), мг/л	9,00	0,051	0,094	0,074	0,091	0,096	0,105
Нефтепродукты, мг/л	0,05	3,400	1,400	0,400	0,140	0,600	1,200
Хлориды (Cl), мг/л	300,0	0,101	0,027	0,041	0,061	0,071	0,081
Сульфаты (SO ₄), мг/л	100,0	0,888	0,780	0,821	0,877	0,862	0,903
Железо общее (Fe), мг/л	0,030	3,000	1,667	1,667	2,267	2,433	2,400
Медь (Cu), мг/л	1,000	1,000	3,960	7,260	7,520	7,780	7,410
Цинк (Zn), мг/л	10,00	0,667	1,415	0,195	0,193	0,345	0,407
ИЗВ		1,208	1,108	1,235	1,372	1,510	1,560
Класс качества воды		III	III	III	III	III	III
Коэффициент предельно-допустимой загрязненности воды K _{ндзи}							
Азот аммонийный (NH ₄), мг/л	0,39	0,074	0,120	0,142	0,286	0,229	0,251
Азот нитритный (NO ₂), мг/л	0,02	0,632	0,394	0,394	0,632	0,683	0,713
Азот нитратный (NO ₃), мг/л	9,00	0,050	0,090	0,071	0,087	0,092	0,100
Нефтепродукты, мг/л	0,05	0,967	0,754	0,330	0,131	0,451	0,699
Хлориды (Cl), мг/л	300,0	0,096	0,027	0,040	0,060	0,069	0,078
Сульфаты (SO ₄), мг/л	100,0	0,589	0,542	0,560	0,584	0,578	0,595
Железо общее (Fe), мг/л	0,030	0,350	0,811	0,811	0,896	0,912	0,909
Медь (Cu), мг/л	1,000	0,632	0,981	0,911	0,999	0,999	0,999
Цинк (Zn), мг/л	10,00	0,487	0,757	0,757	0,176	0,292	0,335
K _{нзи}		0,431	0,496	0,454	0,417	0,479	0,520
K _{ндзи} = k _b · K _{нзи}		0,461	0,436	0,409	0,338	0,469	0,536

В пределах водосборных территорий бассейна реки Иле, то есть выше и ниже Капшагайского водохранилища наблюдаются некоторые улучшения качества воды, которые объясняются более интенсивной биомиграцией аммонийного и нитритного азота, железа и цинка в условиях активных продукционных процессов. При этом, в самом нижнем гидрологическом створе Ушжарма наблюдается увеличение концентрации органических веществ и тяжелых

металлов, где потенциальными источниками техногенного загрязнения являются сточные воды промышленных и коммунально-бытовых объектов.

Как видно из данных в табл. 2 и рис. 1 коэффициент предельно-допустимой загрязненности воды имеет ярко выраженную связь с индексом загрязненности воды, которая описывается логарифмическим уравнением, имеющего следующий вид:

$$K_{ндзи} = 0,1283 \cdot \ln(ИЗВ) + 0,64161, \quad r = 0,811 \quad (11)$$

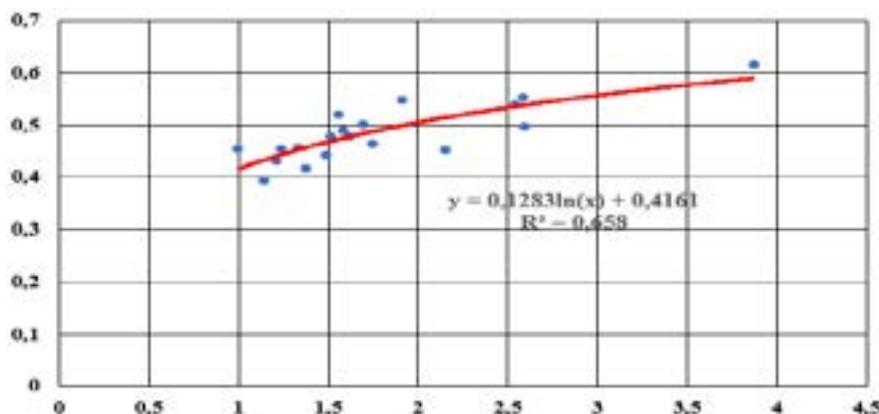


Рис. 1. График зависимости коэффициента предельно-допустимого загрязнения (ордината) от индекса качества воды (абсцисса).

Таким образом, достаточно высокий коэффициент корреляции между коэффициентом предельно-допустимой загрязненности воды и индексом загрязненности воды позволяет использовать его для оценки экологического состояния водных объектов и через индекс загрязненности воды, связанный с индексом Шеннона (H), характеризовать видовое разнообразие сообществ зоопланктона и зообентоса [10, 15] (табл. 3 и рис. 2).

Таблица 3

Классификация качества воды и состояния водных ресурсов по гидрохимическим и гидробиологическим показателям

Показатель	Класс качества воды					
	I	II	III	IV	V	VI
$ИЗВ$	<0,20	0,20...1,00	1,00...2,00	2,00...4,00	4,00...6,00	>6,00
K_{ndzi}	<0,10	0,10...0,40	0,40...0,50	0,50...0,60	0,60...0,65	>0,65
H	3,06...2,30	2,30...1,89	1,89...1,52	1,52...1,25		1,25...1,11
Качества воды	очень чистая	чистая	умеренно загрязненная	загрязненная	грязная	очень грязная
Трофность	олиготрофная	мезотрофная		эвтрофная		Гипертрофная

Связи между отдельными гидрохимическими и гидробиологическими показателями известны и очевидны [1, 2, 5, 9], так как они имеют генетические сходства и характеризуют конкретную водную экосистему, следовательно, оценка ее состояния разными показателями дает одни и те же результаты, только изменяются количественные параметры, определяющие границы перехода одного состояния в другой.

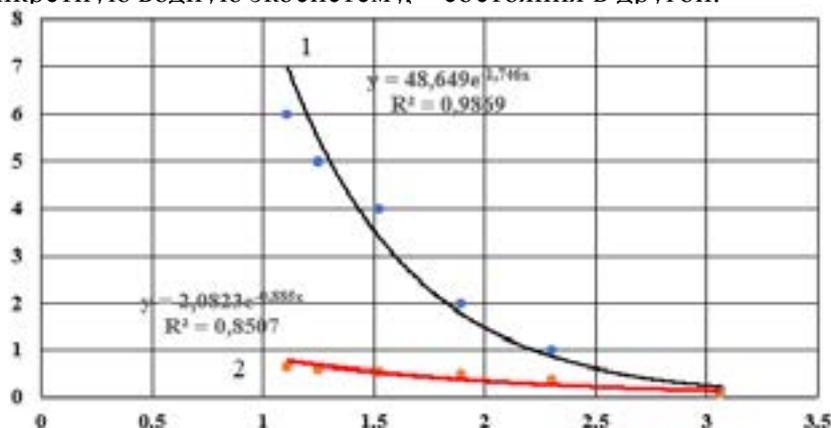


Рис. 2. График зависимости индекса загрязненности воды (1) и коэффициента предельно-допустимого загрязнения (2) (ордината) от индекса Шеннона (абсцисса).

Для выявления связи между индексом Шеннона и индексом загрязненности воды и коэффициентом предельно-допустимой загрязненности воды построен совместный график (рис. 2),

который показал, что между ними имеется экспоненциальная зависимость с высоким коэффициентом корреляции, описываемая следующими уравнениями:

$$ИЗВ = 48,649 \cdot \exp(-1,74 \cdot H), \quad r = 0,9934 \quad (12)$$

$$K_{ндзи} = 2,0822 \cdot \exp(-0,885 \cdot H), \quad r = 0,9223 \quad (13)$$

Для оценки экологического состояния водной экосистемы, которая определяется на основе индекса Шеннона, представляющего собой параметр оценки видового разнообразия, необходимо было построить график зависимости индекса Шеннона от индекса

загрязненности воды (рис. 3), а также от коэффициента предельно-допустимого загрязнения (рис. 4), которые показывают, что между ними имеется экспоненциальная зависимость с высоким коэффициентом корреляции:

$$H = 2,8558 \cdot \exp(-0,163 \cdot ИЗВ), \quad r = 0,9846 \quad (14)$$

$$H = 4,0722 \cdot \exp(-1,818 \cdot K_{ндзи}), \quad r = 0,9457 \quad (15)$$

На основе проведения комплексной оценки современного экологического состояния водосбора бассейна реки Иле (табл. 2) разработан методологический подход с учетом водности и закона лимитирующего фактора, который по-

зволил разработать математическую модель для расчета коэффициента предельно-допустимого загрязнения и оценки качества по индексам загрязненности воды и Шеннона (рис. 2), имеющих генетические и структурные сходства.

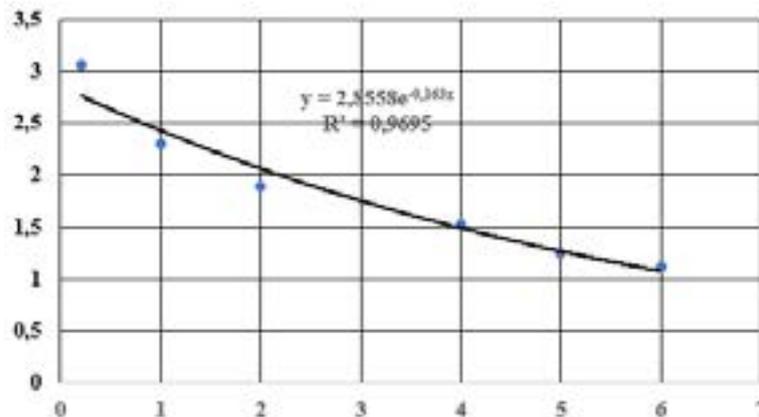


Рис. 3. График зависимости индекса Шеннона (ордината) от индекса загрязненности воды (абсцисса).

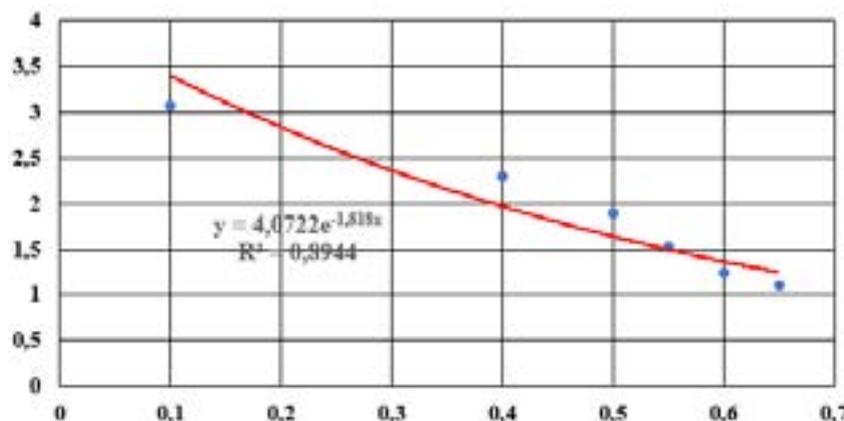


Рис. 4. График зависимости индекса Шеннона (ордината) от коэффициента предельно-допустимого загрязнения (абсцисса).

Таким образом, оценка условий формирования качества воды и специфика химического свойства воды на водосборных территориях бассейна реки Иле позволили их типизировать на неравнозначные два водохозяйственных участка, то есть от зоны формирования стока до водохранилища Капшагай, где загрязнение речных вод носит трансграничный характер и от водохранилища Капшагай до озера Балкаш, где за счет антропогенных нагрузок промышленных и сельскохозяйственных объектов происходит некоторое улучшение качества воды, которое проявляется на основе самоочищающейся способности водной экосистемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка качества воды проведена на основе информационно-аналитических материалов РГП «Казгидромет», охватывающих 1995...2019 годы по четырем гидрологическим створам водосборного бассейна реки Иле, а именно гидрологический пост Добын, расположенный на границе Республики Казахстан и Китайской Народной Республики, гидрологические посты, расположенные на 164 км выше и 26 км ниже Капшагайского водохранилища и гидрологический пост Ушжарма (зоны magazинирования стока). Она показала, что от зоны формирования стока до водохранилища Капшагай загрязнение речных вод носит трансграничный характер и относится к классу «загрязненной» (IV), а от водохранилища Капшагай до озера Балкаш происходит за счет антропогенных нагрузок промышленных и сельскохозяйственных объектов, где качество воды оценивается «умеренно загрязненная» (III), то есть некоторое улучшение качества воды проявляется на основе самоочищающейся способности водной экосистемы.

На основе проведения комплексной оценки современного экологического состояния водосбора бассейна реки Иле (табл. 2) и структурного анализа методов оценки качества воды разработана математическая модель коэффициента предельно-допустимого загрязнения с учетом водности речных бассейнов и закона лимитирующего фактора, то есть с двумя признаками по совокупности коэффициента водности, как отношение фактического расхода воды к среднемуголетнему расходу воды и коэффициента

предельной загрязненности или индекса загрязненности воды, как сумма приведенных к ПДК_г фактических значений основных показателей качества воды (C_i), которые описываются экспоненциальной функцией. Дана сравнительная оценка их с индексом загрязненности воды и Шеннона, которая показала, что они имеют генетические и структурные сходства, что позволяет использовать их для оценки экологического состояния водных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов А.Ф. Основные положения теории функционирования водных экосистем // Гидробиологический журнал, 1990. – Том 26. – №6. – С. 3-12.
2. Булгаков Н.Г., Дубинина В.Г., Левич А.П., Терехин А.Т. Метод поиска сопряженностей между гидробиологическими показателями и абиотическими факторами среды // Известия РАН, серия биологическая, 1995. – Вып. 2. – С. 218-225.
3. Бурлибаев М.Ж., Амиргалиев Н.А., Шенбергер И.В., Сокольский В.А., Бурлибаева Д.М., Уваров Д.В., Смирнова Д.А., Ефименко А.В., Милюков Д.Ю. Проблемы загрязнения основных трансграничных рек Казахстана. – Алматы: Издательство «Қанағат», 2014. – Том 1. – 744 с.
4. Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. – Москва: Госкомгидромета, 1986. – 6 с.
5. Методические рекомендации по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. – Москва: Госкомгидромета, 1988. – 6 с.
6. Мустафаев Ж.С., Козыкеева А.Т., Рыскулбеков Л.М. Пространственно-временная изменчивость стока реки Иле в условиях антропогенной деятельности // Гидрометеорология и экология. – 2021. – №1. – С. 88-99.
7. Попов В.А. Математическое выражение закона лимитирующего фактора и его приложение к задачам мелиоративного земледелия // Мелиорация и водное хозяйство. – 1997. – №2. – С. 30-34.
8. Родзиллер И.Д. Прогноз качества воды

водоемов-приемников сточных вод. – М.: Стройиздат, 1984. – 263 с.

9. Шабанов В.В., Маркин В.Н. Метод оценки качества вод и состояния водных экосистем. – М.: МГУП, 2009. – 154 с.

10. Шеннон К. Математическая теория связи / Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Ин. литер., 1963. – С. 243-332.

11. Шлычков А.П., Жданова Г.Н., Яковлева О.Г. Использование коэффициента стока загрязняющих веществ для оценки состояния рек // Мониторинг. – 1996. – №2. – С. 23-27.

12. Godwin Asibor, Oborakpororo Ofuya. Surface Water Quality Assessment of Warri Metropolis Using Water Quality Index// International Letters of Natural Sciences. – 2019 – March (Volume 74). – P. 45-52.

13. Kunwar Raghvendra Singh, Rahul Dutta, Aiav S. Kalamdhad, Bimlesh Kumar. Information entropy as a tool in surface water quality assessment // Environmental Earth Sciences. – 2019. – January Volume 78(1). – P. 1-12.

14. Nich N., Perjoiu M. The surface water quality assessment//Environmental engineering and management journal – 2004. – September 3(3). – P. 477-488.

15. Shannon C.B., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. – Urbana (Illinois): Univ. of Illinois Press, 1963. – 345 p.

16. Sipra Mallick, F. Baliarsingh. Surface Water Quality Assessment and Prediction Modelling of Kathajodi River//International Journal of Emerging Research in Management & Technology. – 2017, August. (Volume-6). – P. 447-457.

17. Tirupathi Chanapathi, Thhatikkonda Shashidhar. Fuzzy-Based Regional Water Quality Index for Surface Water Quality Assessment // Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste. – 2019. – May, Vol.23. – Issue 4.

REFERENCES

1. Alimov A.F. Osnovnye polozheniya teorii funktsionirovaniya vodnykh ekosistem // Gidrobiologicheskii zhurnal, 1990. – Tom 26. – №6. – S. 3-12.

2. Bulgakov N.G., Dubinina V.G., Levich A.P., Terekhin A.T. Metod poiska sopryazhennostei mezhdru gidrobiologicheskimi pokazatelyami i abioticheskimi faktorami sredy // Izvestiya RAN,

seriya biologicheskaya, 1995. – Vyp. 2. – S. 218-225.

3. Burlibaev M.Zh., Amirgaliev N.A., Shenberger I.V., Sokol'skii V.A., Burlibaeva D.M., Uvarov D.V., Smirnova D.A., Efimenko A.V., Milyukov D.Yu. Problemy zagryazneniya osnovnykh transgranichnykh rek Kazakhstana. – Almaty: Izdatel'stvo «Qanarat», 2014. – Tom 1. – 744 s.

4. Vremennye metodicheskie ukazaniya po kompleksnoi otsenke kachestva poverkhnostnykh i morskikh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam. – Moskva: Goskomgidrometa, 1986. – 6 s.

5. Metodicheskie rekomendatsii po formalizovannoi kompleksnoi otsenke kachestva poverkhnostnykh i morskikh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam. – Moskva: Goskomgidrometa, 1988. – 6 s.

6. Mustafaev Zh.S., Kozykeeva A.T., Ryskulbekov L.M. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' stoka reki Ile v usloviyakh antropogennoi deyatelnosti // Gidrometeorologiya i ekologiya. – 2021. – №1. – S. 88-99.

7. Popov V.A. Matematicheskoe vyrazhenie zakona limitiruyushchego faktora i ego prilozhenie k zadacham meliorativnogo zemledeliya // Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo. – 1997. – №2. – S. 30-34.

8. Rodziller I.D. Prognoz kachestva vody vodoemov-priemnikov stochnykh vod. – M.: Stroizdat, 1984. – 263 s.

9. Shabanov V.V., Markin V.N. Metod otsenki kachestva vod i sostoyaniya vodnykh ekosistem. – M.: MGUP, 2009. – 154 s.

10. Shannon K. Matematicheskaya teoriya svyazi / Raboty po teorii informatsii i kibernetike. – M.: In. liter., 1963. – S. 243-332.

11. Shlychkov A.P., Zhdanova G.N., Yakovleva O.G. Ispol'zovanie koeffitsienta stoka zagryaznyayushchikh veshchestv dlya otsenki sostoyaniya rek // Monitoring. – 1996. – №2. – S. 23-27.

12. Godwin Asibor, Oborakpororo Ofuya. Surface Water Quality Assessment of Warri Metropolis Using Water Quality Index// International Letters of Natural Sciences. – 2019 – March (Volume 74). – P. 45-52.

13. Kunwar Raghvendra Singh, Rahul Dutta, Aiav S. Kalamdhad, Bimlesh Kumar. Information entropy as a tool in surface water quality assessment // Environmental Earth Sciences. – 2019. – January

Volume 78(1). – P. 1-12.

14. *Nich N., Perjoiu M.* The surface water quality assessment//Environmental engineering and management journal – 2004. – September 3(3). – P. 477-488.

15. *Shannon S.V., Weaver W.* The Mathematical Theory of Communication. – Urbana (Illinois): Univ. of Illinois Press, 1963. – 345 r.

16. *Sipra Mallick, F. Baliarsingh.* Surface Water

Quality Assessment and Prediction Modelling of Kathajodi River//International Journal of Emerging Research in Management & Technology. – 2017, August. (Volume-6). – P. 447-457.

17. *Tirupathi Chanapathi, Thhatikkonda Shashidhar.* Fuzzy-Based Regional Water Quality Index for Surface Water Quality Assessment // Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste. – 2019. – May, Vol.23. – Issue 4.

ӨЗЕН АЛАБЫНЫҢ ЖЕР БЕТІ СУЫНЫҢ САПАСЫН МАТЕМАТИКАЛЫҚ ТАЛДАУ АРҚЫЛЫ ГЕОЭКОЛОГИЯЛЫҚ ТҮРҒЫДА БАҒАЛАУ (ІЛЕ ӨЗЕННІҢ ТҮРҒЫСЫНДА)

Ж.С. Мұстафаев¹ техника ғылымдарының докторы, **Л.М. Рысқұлбекова¹**

¹Қазақ Ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: z-mustafa@rambler.ru

Өртүрлі өзеннің алабында жер беті суының ластануын бағалауға пайдаланатын кешенді гидрохимиялық белгіге құрылымдық талдауды жүргізудің және дәлелдемелерді шектеу заңдылығының және судың ластану белгісінің (*ИЗВ*) негізінде, табиғат заңдарына, табиғи жүргілердің қағидасына мен қасиеттеріне бағынатын, судың ластануының шектелген-мүмкіншілік көрсеткішінің (K_{ndzi}), судың мөлшерінің қатынастық көрсеткіші (K_b) мен судың ластануының шектелген көрсеткішінің (K_{nzi}) көбейтіндісі түрінде қарастыратын математикалық модель құрылды және оны Іле өзенінің алабындағы жер беті суларының сапасын кеңістік-уақыт масштабында, су айдындарындағы балық шаруашылығына арналған ластанушы заттардың қойыртпағының шектелген-мүмкіншілік сынақтық мөлшерін пайдалану арқылы бағалаудың нәтижесі көрсеткендей, судың ластануының шектелген-мүмкіншілік көрсеткіші (K_{ndzi}) мен судың ластану белгісінің (*ИЗВ*) арасында логарифмдік теңдеумен сипаталатын айқын байланыс бар екендігін көрсеткендіктен, оны су нысандарының экологиялық жағдайын бағалауға пайдалануға болады. Іле өзенінің алабының суының сапасын бағалау төрт гидрологиялық бекеттер бойынша жүргізілді және оның нәтижесі көрсеткендей, сулың ластануы трансшекаралық сипата болады, өйткені Қазақстан Республикасы мен Қытай Халық Республикасының шекарасында орналасқан Добын гидрологиялық бекетінің тұсында судың сапасы «ластанған», ал Қапшағай су қоймасынан Балқаш көліне дейін «орташа ластанған», яғни су экожүйесінің және салаларынан келетін сулардың өзін-өзі тазарту қабілетінің арқасында, бұл аралықта судың сапасының біраз жақсару байқалады.

Түйін сөздер: өзен алабы, гидрохимиялық көрсеткіштер, ластану, судың сапасын бағалау, әдістеме, талдау, табиғи жүргілердің қасиет

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF SURFACE WATER OF A RIVER BASIN WITH MATHEMATICAL ANALYSIS (ON THE EXAMPLE OF THE ILE RIVER)**Zh.S. Mustafayev¹** Doctor of Technical Sciences, **L.M. Ryskulbekova¹***¹Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: z-mustafa@rambler.ru*

Based on the structural analysis of complex hydrochemical indices for assessing surface water pollution used in various river basins, and the laws of limiting factors, a mathematical model was obtained in the form of the maximum permissible water pollution coefficient ($K_{ндзи}$), representing the product of the water content coefficient (K_b) and the maximum water pollution ($K_{нзи}$), by based on the laws of nature, principles and properties of natural processes in, together with the water pollution index ($IЗВ$), are used for the geoecological assessment of the surface water quality of the Ile River basin on a spatial-temporal scale, taking into account the regulatory criteria for maximum permissible concentrations of pollutants for fishery water bodies, that between the coefficient of the maximum permissible water pollution ($K_{ндзи}$) and the water pollution index ($IЗВ$) there is a pronounced relationship, described by a logarithmic equation, allowing them to be used to assess the ecological state water bodies. Water quality assessment was carried out for four hydrological sections of the Ile River catchment basin, which showed that water pollution is of a transboundary nature, since at the Dobyn hydrological station, located on the borders of the Republic of Kazakhstan and the People's Republic of China, the water quality is «polluted», and from the Kapshagai reservoir to Lake Balkhash «moderately polluted», where due to the self-cleaning ability of the aquatic ecosystem and the waters coming from the tributaries, there is some improvement in water quality.

Keywords: river basin, hydrochemical indicators, pollution, water quality assessment, method, analysis, properties of natural processes