

Н.В. Мякишева, З.М. Жумангалиева

ВНЕШНИЙ ВОДООБМЕН ОЗЕР ЗОНЫ НЕДОСТАТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ

N.V. Myakisheva, Z.M. Zhumangalieva

EXTERNAL WATER EXCHANGE OF THE LAKES OF THE TERRITORY OF INSUFFICIENT HUMIDIFICATION

Оценен внешний водообмен озер Северного Казахстана. Рассмотрено 170 объектов. Рассчитаны три набора коэффициентов внешнего водообмена озер: по притоку, по притоку и осадкам, по испарению. Для оценки доли участия активных и адаптивных факторов при формировании внешнего водообмена озер вычислены климатический и морфометрический индексы водообмена. Выполнено районирование территории по индексам водообмена.

Ключевые слова: внешний водообмен озер, классификация, индексы водообмена.

The external water exchange of north Kazakhstan lakes is estimated. 170 water objects are reviewed. Three sets of the external water exchange indices were calculated: calculation using inflow, calculation using inflow and precipitation, calculation using evaporation. Climatic and morphometric indices of water exchange were calculated for the estimation of the share of active and adaptive factors in formation of the external water exchange. Territory zoning using external water exchange indices was made.

Key words: external water exchange of lakes, classification, indices of the external water exchange.

Введение

Внешний водообмен озер является одной из важнейших гидрологических и гидроэкологических характеристик. Интенсивность внешнего водообмена озера во многом определяет структуру рядов уровней, трансформируя кривую распределения речного притока. От скорости обмена водной массы водоема во многом зависит его гидрологический, гидрохимический и гидробиологический режимы. Величина водообмена определяет формирование водных масс определенных свойств. Так, интенсивный водообмен способствует более резким колебаниям температуры воды, ее цветности, прозрачности, минерализации, а также ионного и газового состава. В водоемах с интенсивным водообменом наблюдается большее разнообразие видов фито- и зоопланктона и меньшая их биомасса, чем в водоемах с замедленным водообменом. От величины водообмена в значительной степени зависит интенсивность развития сине-зеленых водорослей, продукция органических веществ. Интенсивность водообмена определяет степень трансформации поступающих в водоем вод, а также степень аккумуляции или транзита взвешенных наносов и загрязняющих веществ. При интенсивном водообмене большая часть поступающих наносов проходит транзитом через водоем, при замедленном – аккумулируется в нем. Величина внешнего водообмена определяет тип озерного лимногенеза, т.е. взаимообусловленную связь и

развитие всех природных комплексов озера и окружающей его природной среды, которые определяют характер круговорота вещества и энергии в водоемах различных географических зон.

Внешний водообмен определяется количеством воды, поступившей в водоем, и размером озерной котловины. Количество поступившей воды (поверхностный и подземный приток, осадки на водное зеркало) зависит прежде всего от увлажненности территории, от зонального фактора, а также от величины площади водосбора озера и размеров его котловины, т.е. от факторов азональных.

Изучению внешнего водообмена озер уделялось и уделяется большое внимание [Богословский..., 1984; Сорокин, 1988; Мякишева, 2001]. Однако в большинстве работ оценивался водообмен озер зоны избыточного и достаточного увлажнения.

Для характеристики интенсивности внешнего водообмена озер применяется несколько показателей, каждый из которых позволяет оценить те или иные процессы, происходящие в озерной системе, и решать различные лимнологические задачи. Все эти показатели основаны на решении уравнения водного баланса, рассчитанного за время t или при его равновесном состоянии. Наиболее часто применяется коэффициент водообмена по притоку ($K_{В.пр}$) или стоку ($K_{В.ст}$). Однако во многих случаях приток и сток в водном балансе играют подчиненную роль, а в зоне недостаточного увлажнения потери воды происходят преимущественно через испарение. Коэффициент водообмена правильнее определять путем отнесения к объему воды в озере всей приходной или расходной части водного баланса. При равновесном балансе приходные и расходные его части должны быть равными.

Коэффициенты $K_{В.пр}$ и $K_{В.ст}$ являются условными, так как рассчитываются при допущении, что вода в озере полностью заменяется новой, т. е. вытесняется из него, не смешиваясь. В естественных озерах это встречается крайне редко. Тем не менее, несмотря на такую схематичность, коэффициенты водообмена являются наиболее показательными при сравнительном изучении озер, расположенных в различных физико-географических зонах.

Район исследования

Район исследования охватывает территорию Северного Казахстана, где в западной его части сосредоточены горы Южного Урала и Тургайское плато, в центре находится Тургайская ложбина, далее к востоку простираются возвышенности Казахского мелкосопочника, северная часть ограничивается Ишимской равниной. Общая площадь поверхности всех озер Северного Казахстана составляет свыше 19 тыс. км², что несколько превышает площадь озера Балхаш и почти равна половине Азовского моря.

Наиболее крупные озера сосредоточены вдоль Тургайского прогиба (Кушмурун, Аксуат, Сарыкопа, Сарымоин, Тенгиз и др.), на юге Акмолинской области (Тенгиз, Кургальджин, Алаколь и др.) и на северо-западе Павлодарской об-

ласти (Кызылкак, Жалаулы и др.). Пресные озера приурочены в основном к лесостепной зоне и к Казахскому мелкосопочнику, а также к низовьям крупных рек.

Географическое положение Северного Казахстана в двух природных зонах отражается на характере размещения озер. В первой, лесостепной зоне озер много, и пресные среди них встречаются чаще. В целом озера расположены довольно равномерно в пределах зоны, но больше их сосредотачивается в древних ложбинах стока, в межгрядовых понижениях и котловинах. В степной зоне озера приурочены чаще к древним долинам стока (Тургайская долина), к межсопочным понижениям (оз. Имантау, Коксенгирсор и др.), к устьевым участкам рек, стекающих с Казахской складчатой страны (Селетытенгиз, Жалаулы и др.), имеющих в этих местах обширные пологие впадины и понижения. В пределах полупустынной зоны озера преимущественно встречаются в обширных котловинах (Тенгиз-Кургальджинская группа озер, Сарыкопа). Вода в этих озерах нередко сильно минерализована.

Материалы и методы

Рассчитаны три набора коэффициентов внешнего водообмена озер: по притоку, по притоку и осадкам, по испарению. При расчете коэффициентов значения модуля стока, испарения и осадков, отнесенные к центрам тяжести озерных водосборов, снимались с карт Атласа мирового водного баланса [Атлас..., 1974; Мировой водный..., 1974]. При этом центры тяжести озерных водосборов определялись с учетом поправок на бессточные понижения. Средние многолетние значения модуля стока корректировались с учетом поправок на редукцию.

Распределение озер Северного Казахстана по величине коэффициента внешнего водообмена, представленного на рис. 1 в соответствии с классификацией Б.Б. Богословского [Богословский..., 1984], показало следующее. Преобладающее число озер является аккумулятивными. При этом на долю озер с замедленным водообменом (класс А1; $0,3 < K_B < 1,0$) приходится около 30 %, на долю озер с малым водообменом (класс А2; $0,1 < K_B < 0,3$) – около 60 %. Аккумулятивно-транзитные среднепроточные (класс АТ1) и слабопроточные (класс АТ2) озера встречаются только в 2 % случаев.

Анализ полученных результатов показал, что независимо от того, как рассчитывались коэффициенты, на рассматриваемой территории выделяются два района. Первый сосредоточен преимущественно в предгорьях Южного Урала и Тургайском плато. Второй – представляет собой южную часть Ишимской равнины Западной Сибири и северную часть Казахского мелкосопочника. Причем, величина коэффициента внешнего водообмена увеличивается по направлению к центру этих озерных районов.

Внешний водообмен определяется как климатическими (активными) факторами, так и строением озерных систем (адаптивными факторами). Для оценки доли участия активных и адаптивных факторов при формировании внешнего водообмена озер строились климатический и морфометрический индексы водообмена.

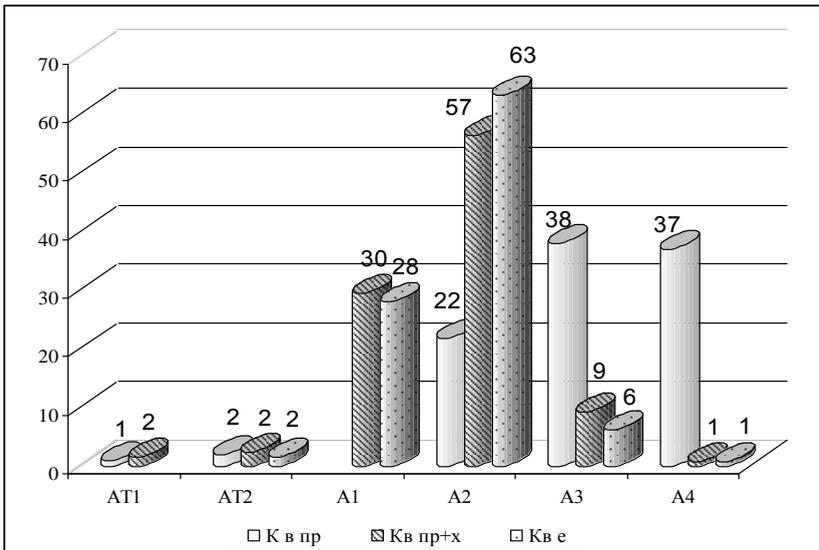


Рис. 1. График распределения озер Северного Казахстана по коэффициентам внешнего водообмена, %

Морфометрические особенности водообмена озер могут быть с достаточной полнотой описаны с учетом следующих относительно независимых исходных характеристик: x_1 – площадь водосбора ($F_{\text{вдсб}}$), x_2 – объем озера (W_0), x_3 – коэффициент удельного водосбора ($K = F_{\text{вдсб}}/F_{\text{оз}}$), x_4 – показатель формы котловины ($C_1 = H_{\text{ср}}/H_{\text{макс}}$), x_5 – высота озера над уровнем моря ($H_{\text{абс}}$) [Догановский..., 2002].

Диапазоны изменения исходных морфометрических характеристик весьма различны. Так, площади водосбора изменяются от 4,8 км² для озера Козявочное до 23400 км² для озера Селетытенгиз, находящего на границе Кокшетауской и Павлодарской областей Северного Казахстана.

Высота зеркала озер над уровнем моря варьирует от 28 м для озера Теке до 680 м для озера Жукей. Преобладающее большинство озер (около 70 %) находится в высотном поясе от 100 до 200 м над уровнем моря.

По классификации, выполненной П.В. Ивановым, большая часть выбранных озер (около 80 %) имеет площадь зеркала в пределах от 1 до 10 км² и может быть отнесена к категории «малые». Для 14 % водоемов площадь водной поверхности изменяется от 10 до 100 км². Это – «средние озера».

Объемы озер изменяются от 0,00086 км³ (Маралды, Муялды, Кунек, Экиба-стуз и др.) до 279 км³ (Имантау, Жукей, Атансор). В соответствии с классификацией, принятой в нормативной документации, преобладающее большинство исследуемых водоемов (около 83 %) характеризуется малым объемом (до 0,5 км³). В категории средних водоемов ($1,0 \text{ км}^3 > W_0 > 0,5 \text{ км}^3$) озера региона не представлены. К категории больших водоемов ($10,0 \text{ км}^3 > W_0 > 1,0 \text{ км}^3$) относятся около 4 % (Карасор, Селетытенгиз, Каргайчик), к категории очень больших

озер ($100 \text{ км}^3 > W_0 > 10 \text{ км}^3$) относится также около 4 % водоемов (Жукей, Айдабуль, Жамантуз).

Удельные водосборы озер изменяются от 0,89 для озера Калатуз до 295 для озера Копа. По классификации С.В. Григорьева около 29 % исследованных озер имеют малые удельные водосборы ($K < 10$). Более половины объектов (69 %) относится к категории со средним удельным водосбором ($10 < K < 100$) и только около 2 % – к категории с большим удельным водосбором ($100 < K$).

Поскольку диапазоны изменения характеристик сильно варьировали, то возникла необходимость их предварительного «нормирования». Для этого вместо исходной характеристики x_i рассматривается нормированная характеристика $q_i = q_i(x_i)$, где q_i – некоторая монотонная (возрастающая или убывающая) функция, такая, что $0 \leq q_i \leq 1$, $I = 1, \dots, m$. При этом указанная нормирующая функция q_i может быть интерпретирована как отдельный показатель или критерий интенсивности внешнего водообмена озер. Так, например, в нашем случае, $q_1 = 0$ (нормированная площадь водосбора) соответствует практически бесприточному озеру, а $q_1 = 1$ – сточному. Аналогично интерпретируются и другие отдельные характеристики водообмена. В результате нормирования исходных морфометрических характеристик для j -й озерной системы был получен вектор $q^{(j)} = (q_1^{(j)}, \dots, q_5^{(j)})$ отдельных показателей q_1, \dots, q_5 , каждый из которых оценивает внешний водообмен озера с точки зрения соответствующей исходной характеристики. Иными словами, вектор $q^{(j)} = (q_1^{(j)}, \dots, q_5^{(j)})$ есть *многокритериальная оценка* особенностей внешнего водообмена, определяемых морфометрией.

Для таких исходных характеристик, как $F_{\text{вдсб}}$, K , $H_{\text{абс}}$ была выбрана простейшая линейная возрастающая нормирующая функция. Для показателей W_0 и C_1 использовался другой вид зависимости – линейная убывающая функция вида. Для озер, расположенных в одинаковых по увлажненности условиях, при прочих равных условиях водообмен будет тем больше, чем водосборная площадь, с которой собирается поверхностный и подземный приток. С увеличением удельного водосбора при прочих равных условиях увеличивается доля притока и стока в водном балансе озера, а следовательно, возрастает и внешний водообмен. Водообмен озер при одинаковых значениях удельного водосбора уменьшается при изменении формы котловины от усеченного конуса к цилиндру. При увеличении высоты озера над уровнем моря увеличивается количество осадков и уменьшается температура воздуха, а следовательно, увеличивается внешний водообмен.

При расчетах было учтено, что сводный показатель есть линейная функция. Также были заданы четыре варианта дополнительной экспертной информации I о сравнительной значимости отдельных морфометрических показателей внешнего водообмена озер. Получены четыре набора оценок $Q^{(j)}(I) = MM^{(j)}$, $j = 1, \dots, N$, где N – количество озерных систем, и четыре набора значений $S^{(j)}(I)$ точности этих оценок. Значения весовых коэффициентов, использованные для их расчета, даны в табл. 1.

Таблица 1

Оценки весовых коэффициентов \tilde{w}_i при расчете морфометрического индекса внешнего водообмена озер

Дополнительная экспертная информация (вариант расстановки приоритетов)	$M_{\tilde{w}_i} \pm S_{\tilde{w}_i}$				
	$F_{\text{вдсб}}$	$H_{\text{абс}}$	K	C_1	W_0
$K=F_{\text{вдсб}}=W_0>C_1>H_{\text{абс}}$	$0,27 \pm 0,02$	$0,27 \pm 0,02$	$0,05 \pm 0,04$	$0,15 \pm 0,04$	$0,27 \pm 0,02$
$K=F_{\text{вдсб}}=W_0>C_1=H_{\text{абс}}$	$0,3 \pm 0,0$	$0,3 \pm 0,0$	$0,05 \pm 0,0$	$0,05 \pm 0,0$	$0,3 \pm 0,0$
$K>F_{\text{вдсб}}=W_0>C_1=H_{\text{абс}}$	$0,18 \pm 0,07$	$0,54 \pm 0,18$	$0,05 \pm 0,05$	$0,05 \pm 0,05$	$0,18 \pm 0,07$
$K>F_{\text{вдсб}}>W_0>C_1>H_{\text{абс}}$	$0,28 \pm 0,05$	$0,46 \pm 0,1$	$0,01 \pm 0,03$	$0,08 \pm 0,04$	$0,17 \pm 0,04$
$K=F_{\text{вдсб}}>W_0=C_1>H_{\text{абс}}$	$0,34 \pm 0,07$	$0,34 \pm 0,07$	$0,03 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,05$

Распределение по территории морфометрических индексов водообмена озер MM для пяти различных вариантов дополнительной экспертной информации отличается несущественно. Поэтому для анализа был выбран первый вариант распределения MM для территории Северного Казахстана, представленный на рис. 2.

Высокий морфометрический индекс водообмена MM характерен для озерных систем возвышенных районов территории Северного Казахстана: горы Южного Урала, Зауральское плато, Тургайское плато, Кокшетауская возвышенность, север Казахского мелкосопочника. Низкий индекс наблюдается в пределах Тургайской ложбины, Северо-Казахстанской равнины, южной части Ишимской равнины, частично захватывает западные части Барабинской низменности и Кулундинской равнины.

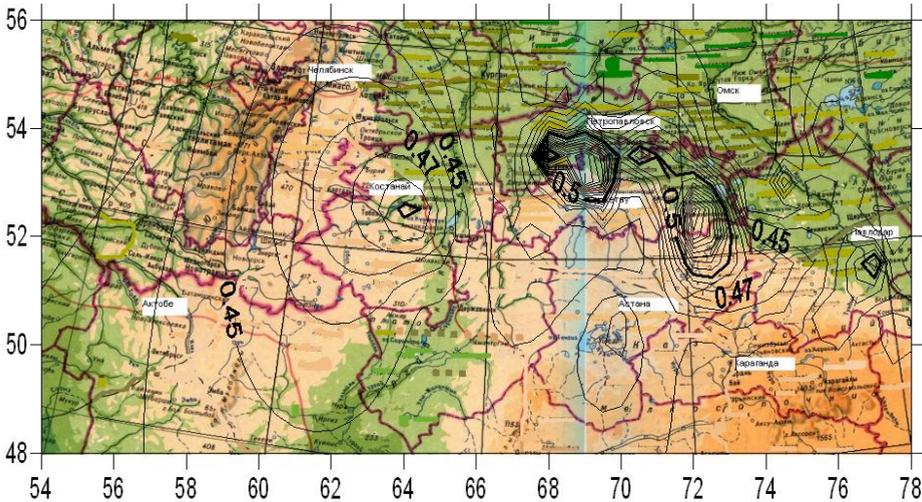


Рис. 2. Распределение морфометрического индекса внешнего водообмена озер Северного Казахстана

Таким образом, по величине морфометрического индекса внешнего водообмена озер на рассматриваемой территории можно выделить два района. Пер-

вый район включает возвышенную часть гор Южного Урала. Второй район находится чуть южнее и охватывает территорию северной части Казахского мелкосопочника.

Картирование значений MM , рассчитанных при четырех других вариантах расстановки приоритетов, показало, что границы выделенных районов принципиально не меняются.

Это свидетельствует об устойчивости полученных оценок сводного морфометрического индекса водообмена и о правомерном задании априорной информации. Ведущими морфометрическими параметрами озерных систем целесообразно считать K , $F_{\text{вдсб}}$, W_0 , а второстепенными $H_{\text{абс}}$ и C_1 . Перестановка приоритетов в пределах этих групп принципиально не влияет на конечный результат.

Кластерный анализ озер в пространстве отдельных морфометрических показателей и коэффициентов внешнего водообмена позволил объединить все озера в четыре класса (табл. 2). В качестве меры сходства использовалось евклидово расстояние между объектами в 6-мерном призначном пространстве. Объединение объектов в кластеры выполнялось по средним расстояниям. Учитывалось, что ведущими морфометрическими показателями являются удельный водосбор, площадь водосбора и объем водной массы. Поэтому объективные и взаимно увязанные шкалы приводятся только для этих характеристик. Выделенные классы озер достаточно обширны, для каждого из них при необходимости может быть сформирована обучающая выборка и с помощью дискриминантного анализа построено решающее правило отнесения неизученных и слабо изученных озер к известному классу.

Таблица 2

Многомерные классы озерных систем

Морфометрические характеристики	Классы			
	I	II	III	IV
Умеренный водообмен ($0,1 < K_B < 1,0$)				
K	1–20 (30)	> 10	>20	>30
$F_{\text{вдсб}}$, км ²	10–100	100–500	500–5000	>5000
W , км ³	0,001–0,01	0,01–0,1	0,1–1,0	1,0–10,0

Климатический индекс внешнего водообмена озер CL определяется с учетом основных факторов увлаженности территории средней многолетней температуры воздуха (T) и средней многолетней суммы атмосферных осадков (P), отнесенных к центру тяжести озерной системы. Для нормирования исходной характеристики T применяется линейная убывающая функция, а для характеристики P – линейная возрастающая нормирующая функция. Такой вид нормирующих функций задан с учетом следующих предпосылок. Внешний водообмен озер в первую очередь определяется зональной величиной увлаженности бассейна. При увеличении количества выпадающих на водосбор осадков и уменьшении температуры воздуха и соответственно испарения увеличивается модуль стока, а, следовательно, и приток воды в озеро, что приводит к увеличению внешнего водообмена озер.

Оценки весовых коэффициентов, использованные для расчета индексов CL , даны в табл. 3. При построении индексов CL использованы три набора экспертной информации I .

Таблица 3

Оценки весовых коэффициентов \tilde{w}_i при расчете климатического индекса внешнего водообмена озер

Дополнительная экспертная информация (вариант расстановки приоритетов)	$M_{\tilde{w}_i} \pm S_{\tilde{w}_i}$	
	T	P
$T = P$	$0,5 \pm 0,0$	$0,3 \pm 0,0$
$T > P$	$0,78 \pm 0,14$	$0,23 \pm 0,14$
$T < P$	$0,5 \pm 0,3$	$0,5 \pm 0,3$

Сопоставление распределения по территории индексов CL , рассчитанных при разных вариантах задания дополнительной экспертной информации, с распределением многолетнего модуля стока q ($л \cdot с / км^2$) показало, что в условиях современного аридного климата следует отдавать предпочтение третьему варианту расстановки приоритетов ($T < P$) в группе климатических характеристик.

Значения CL заметно меняются по территории, как это видно на рис. 3. При этом прослеживается определенная географическая закономерность в их распределении. Высокий климатический индекс озерных систем характерен для северных границ территории ($> 0,5$). Высокие значения индекса CL для территории Южного Урала и южной части Ишимской равнины и западных частей Барабинской низменности и Кулундинской равнины обусловлены низкими величинами температуры воздуха и достаточным количеством осадков. В пределах этого района средние многолетние значения суммы атмосферных осадков меняются от 300 до 380 мм, а средней многолетней температуры воздуха от $0,3$ до $1,3$ °C.

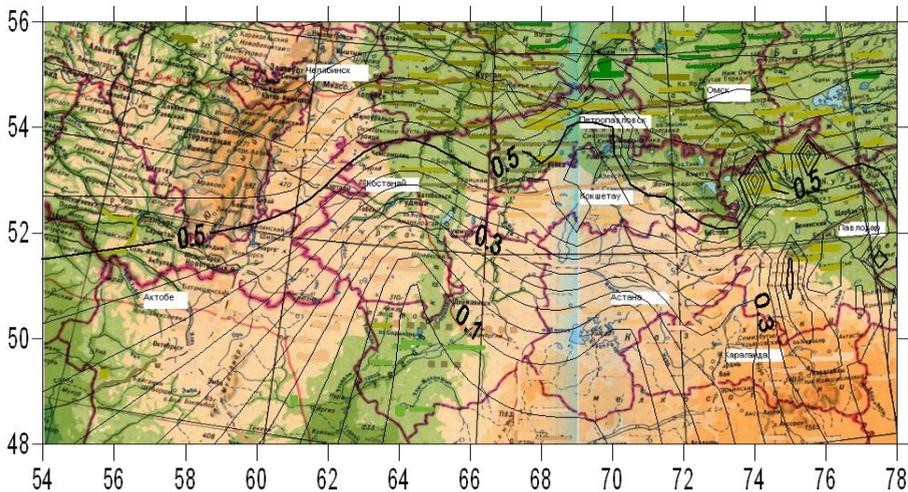


Рис. 3. Распределение климатического индекса внешнего водообмена озер Северного Казахстана

Низкий индекс (<0,5) характерен для южной части территории, где сосредоточены возвышенности Тургайского плато и Казахского мелкосопочника. Здесь низкие значения индекса *CL* обусловлены высокими величинами температуры воздуха. В пределах этого района средние многолетние значения температуры воздуха меняются от 1,8 до 2,5 °С, а средние многолетние суммы атмосферных осадков – от 300 до 250 мм.

Сопоставление климатического индекса внешнего водообмена *CL* с индексом Де Мартона, традиционно используемым для характеристики увлажненности территории, показывает их хорошую согласованность (рис. 4).

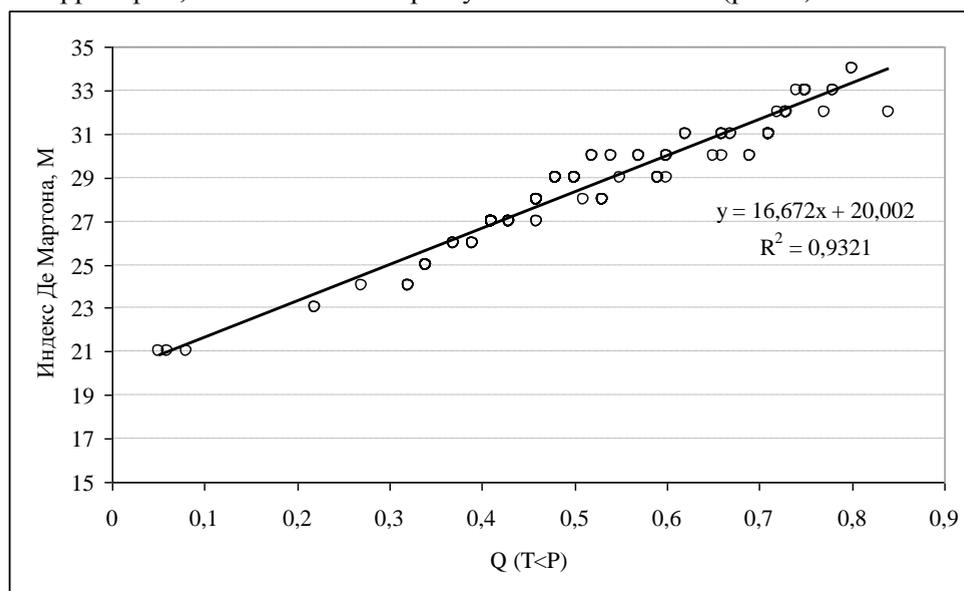


Рис. 4. Зависимость сводного индекса (температура и количество осадков) от индекса Де Мартона для озер Северного Казахстана

Литература

1. Атлас мирового водного баланса Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1974.
2. Богословский Б.Б., Филь С.А. Классификация водоемов по внешнему водообмену // Географо-гидрологический метод исследования вод суши. – М.: Изд. АН СССР. Географич. об-во СССР, 1984, с. 54-60.
3. Догановский А.М., Мякишева Н.В. Построение комплексных индексов внешнего водообмена озер в условиях неопределенности и дефицита гидрологической информации // Водные ресурсы, 2002, т. 29, № 3, с. 284-291.
4. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли (Атлас). – Л.: Гидрометеиздат, 1974.
5. Мякишева Н.В. Внешний водообмен озер зоны избыточного и достаточного увлажнения / Рос. гос. гидромет. ун-т. – СПб., 2001. – 195 с. – Деп. в ВИНТИ 28.02.01, № 533-В2001.
6. Мякишева Н.В., Хованов Н.В. Моделирование индекса увлажненности озерных бассейнов в условиях неопределенности и дефицита исходной информации // Уч.зап. РГГМУ, 2010, № 16, с. 5-15.
7. Сорокин И.Н. Внешний водообмен озер СССР. – Л.: Наука, 1988. – 144 с.