

**ГИДРОЛОГИЯ**

*Н.В. Мякишева, Н.В. Хованов*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДЕКСА УВЛАЖНЕННОСТИ  
ОЗЕРНЫХ БАССЕЙНОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ  
И ДЕФИЦИТА ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

*N.V. Myakisheva, N.V. Hovanov*

**THE LAKES DRAINAGE BASINS HUMIDIFICATION INDICES  
GENERATION UNDER UNCERTAINTY AND DEFFICIENCY  
OF INFORMATION**

*На основе метода рандомизированных сводных показателей (МРСП) моделируется индекс увлажненности территорий. Для верификации индекса используются традиционные показатели климата и увлажненности территорий – индекс Де-Мартона и коэффициент стока. Перечисленные индексы вычисляются для 132 озерных бассейнов, расположенных в зонах избыточного, достаточного и умеренного увлажнения, в состав которых входят ландшафтно-географические зоны от тундры до лесостепей.*

*Ключевые слова: индекс увлажненности, моделирование, верификация.*

*The humidification indices are constructed on the base of randomized integral indices method (RIIM). Verification of these indices is made with the use of traditional indices of De-Martonna and runoff coefficients. The indices are calculated for 132 lake basins which are situated in the zones of surplus, sufficient and moderate humidness. The region of investigation includes geographical zones from tundra to forest-steppes.*

*Keywords: humidification indices, generation, verification.*

## **Введение**

Для описания состояния таких сложных природных систем, как климатическая система Земли, а также протекающих в ней процессов, часто вводятся различные интегральные показатели (индексы). Так, для характеристики процессов общей циркуляции атмосферы – ведущего компонента климатической системы, разработаны индексы Россби, Блиновой, Вительса, Каца, Вангенгейма, Гирса [Гирс, 1971, 1978; Кондратович, 1977; Хромов, 1974]. В последнее время часто используются индексы интенсивности центров действия атмосферы (Исландского минимума, Азорского максимума атмосферного давления в Северной Атлантике), индексы Северо-Атлантического (NAO), Северо-Тихоокеанского (NPO) и Арктического (АО) колебаний в Северном полушарии Земли, индексы

Южно-Полярного (SPO) и Южного (SPI) колебаний в Южном полушарии Земли [Смирнов, 1998, 2002, 2004]. Перечисленные индексы применяются для описания и прогнозирования как самих атмосферных процессов, так и обусловленных ими динамических движений, происходящих в различных объектах гидросферы. К их числу можно отнести многолетние колебания водности рек и уровня наполнения озер, течения и волнение в морях и океанах и т.п.

Для описания крупномасштабных процессов, протекающих в Мировом океане, предложены индексы Эль-Ниньо (NINO12, NINO3, NINO34, NINO4). Взаимный анализ индексов SPI и Эль-Ниньо позволил установить связь между крупномасштабными процессами, протекающими в атмосфере и океане, и ввести совместный индекс Эль-Ниньо – Южное колебание (ENSO) [Астафьева, 1996; Nicholson, 1997].

На качественном уровне степень увлажнения характеризуется понятиями сухость (аридность) и влажность (гумидность) климата той или иной территории, зоны, области и т.д. Для количественной характеристики степени увлажнения используются разнообразные показатели (индексы, коэффициенты) сухости или влажности климата. Большинство из них было введено для классификации климатов, ландшафтно-климатического, почвенно-климатического, ботанического, сельскохозяйственного, гидрологического районирования и др. (так называемые эффективные классификации, исходящие из проявлений климата, неважно в каком аспекте географии).

Показатели сухости (влажности) климата прямо или косвенно отражают соотношение между средними за многолетний период (год, сезон, месяц) осадками ( $P$ , мм) или испаряемостью с открытой поверхности пресных вод или поверхности почвы ( $E_0$ , мм) (первая группа показателей), либо характеризуют отношение осадков к температуре воздуха ( $T$ , °C) (вторая группа показателей). При этом температура учитывается непосредственно или в линейной комбинации с некоторыми числовыми константами.

Первая группа показателей включает индексы Иванова, Высоцкого, индекс сухости и радиационный индекс сухости Будыко, индекс аридности Стенца, индекс гумидности (аридности) климата Торнтвейта и др. Числовой смысл показателей этой группы понятен: при избытке увлажнения ( $P > E_0$ ) индексы  $>1$ , при недостатке ( $P < E_0$ ) индексы  $<1$ . Ко второй группе показателей относят индекс Де-Мартона, показатели Кеппена, Волобуева, индекс засушливости Сазонова, индексы Педя. Переходным между первой и второй группой показателей является, например, широко применяемой в агроклиматологии гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова.

Обзор перечисленных индексов содержится, например, в работах [Хромов, 1974; Чеботарев, 1978]. Особый интерес представляют те из них, которые можно рассчитать по доступной информации и использовать для выделения ландшафтно-географических (климатических) зон.

## Материалы и методы

Перечисленные индексы, как правило, учитывают только значения исходных характеристик, но не учитывают их значимость. Поэтому в настоящей работе для характеристики увлажненности территории моделируется индекс  $H(q; I)$ , синтезирующий отдельные исходные характеристики в единую оценку с учетом как их значений, так и значимости. Индексы  $H(q; I)$  вводятся впервые и рассчитываются в соответствии с методологией АСПИД (анализ и синтез показателей при информационном дефиците) на основе метода рандомизированных сводных показателей (МРСП), изложенных в работах [Хованов, 1988, 1996, 2008], и опробованных в работах [Александрова 2000; Дмитриев, 1996, 1997, 1999; Догановский, 2002; Мякишева, 2009; Огурцов, 1997].

*Метод сводных показателей* (МСП), общая структура которого была разработана А.Н. Крыловым еще в 1908 г., хорошо зарекомендовал себя как инструмент построения сводных (глобальных, интегральных, обобщенных, генеральных, синтетических и т.п.) показателей, синтезирующих отдельные (локальные, дифференциальные, частные, маргинальные, аналитические и т.п.) показатели, характеризующие качество (эффективность, надежность, полезность, предпочтительность и т.п.) любых многопараметрических объектов: сложных технических систем; вариантов управленческих, организационных и инвестиционных решений; мнений отдельных экспертов и экспертных комитетов; экономических проектов и т.д.

Однако при использовании в сводном показателе так называемых *весовых коэффициентов*, измеряющих степень значимости отдельных показателей для сводной оценки, исследователь сталкивается с *дефицитом числовой информации* об этих весовых коэффициентах. Дело в том, что обычно значимость отдельного показателя может быть оценена лишь при помощи сравнительных суждений вида "данный показатель более важен для общей оценки объекта, чем другой показатель", "данные два показателя имеют практически одинаковую значимость для сводной оценки" и т.п. Иными словами, значимость отдельных показателей измеряется по нечисловой (ординальной, порядковой) шкале. В лучшем случае исследователь может знать интервалы возможного варьирования весовых коэффициентов. Такая нечисловая (порядковая) и неточная (интервальная) информация является, зачастую, и неполной: не для всех весовых коэффициентов заданы нетривиальные равенства и неравенства, соответствующие интервальной и порядковой информации.

Нечисловая, неточная и неполная информация (*ннн-информация*) обычно задает не единственный набор весовых коэффициентов, но целое множество допустимых наборов. Иными словами, обычно имеет место *неопределенность* задания весовых коэффициентов, что затрудняет непосредственное применение МСП. Для преодоления этого затруднения было предложено использовать *байесовскую модель рандомизации неопределенности*. Идея этой модели, восходящая к знаменитой работе Томаса Байеса (1702–1761), состоит в переходе от

неопределенного выбора весовых коэффициентов к случайному (рандомизированному) выбору этих коэффициентов из множества всех допустимых (с точки зрения ннн-информации) наборов весовых коэффициентов. Мы получаем, иначе говоря, случайные весовые коэффициенты и случайные (рандомизированные) сводные показатели. Теперь задача сравнения двух многопараметрических объектов сводится к задаче сравнения двух соответствующих рандомизированных сводных показателей, а метод сводных показателей (МСП) превращается в метод рандомизированных сводных показателей (МРСП).

При расчете индекса  $H(q; I)$  считалось, что увлажненность территории с достаточной полнотой может быть описана с учетом следующих относительно независимых исходных характеристик:  $x_1$  – температура воздуха ( $T$ , °C) и  $x_2$  – атмосферные осадки ( $P$ , мм). Индекс  $H(q; I)$  вычислялся по формуле:

$$H^{(j)} = w_1 q_1^{(j)} + w_2 q_2^{(j)}, \quad (1)$$

где  $w_1, w_2$  – весовые коэффициенты ( $w_i \geq 0, w_1 + w_2 = 1$ );  $j$  – номер озерной системы,  $k$  – общее число исследуемых озерных систем;  $j = 1, \dots, k$ ;  $q_1, q_2$  – отдельные показатели или критерии увлажненности территории с точки зрения соответствующей характеристики, то есть нормированные значения характеристик  $T$  и  $P$ . При нормировании считалось, что с увеличением температуры воздуха увлажненность территории уменьшается, а с увеличением количества выпавших осадков – увеличивается. Для нормирования  $T$  применялась простейшая линейная невозрастающая функция

$$q_1 = q_1(T) = \begin{cases} 1, & T \leq T_{\min}, \\ \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}}, & T_{\min} < T \leq T_{\max}, \\ 0 & T > T_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

а для нормирования  $P$  – линейная неубывающая функция

$$q_2 = q_2(P) = \begin{cases} 0, & P \leq P_{\min}, \\ \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}, & P_{\min} < P \leq P_{\max}, \\ 1 & P > P_{\max}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $T_{\min}$  ( $P_{\min}$ ) – минимальное, а  $T_{\max}$  ( $P_{\max}$ ) – максимальное значение характеристики  $T$  (характеристики  $P$ ).

Указанные нормирующие функции  $q_i$  могут быть интерпретированы как отдельные показатели или критерии степени увлажненности территории. Так, при  $q_1 = 0$  (нормированная температура) территория считается переувлажненной, а при  $q_1 = 1$  – засушливой. При  $q_2 = 0$  (нормированные осадки) на террито-

рии наблюдаются засушливые условия, а при  $q_2 = 1$  – переувлажненные. Таким образом, для бассейна  $j$ -й озерной системы получаем вектор  $q^{(j)} = (q_1^{(j)}, q_2^{(j)})$  значений отдельных показателей  $q_1, q_2$ , каждый из которых характеризует увлажненность территории с точки зрения соответствующей характеристики. Иными словами, вектор  $q_1, q_2$  – многокритериальная оценка увлажненности, определяемая температурой воздуха и осадками.

Построение рандомизированных (случайных) весовых коэффициентов  $\tilde{w}_1(I), \tilde{w}_2(I)$  производилось с учетом дополнительной экспертной информации  $I$  о сравнительной значимости отдельных показателей увлажненности. В настоящей работе при расчете индекса  $H(q; I)$  задавались три варианта информации  $I$ , т.е. три варианта расстановки приоритетов оценивания ( $I_1 = \{w_1 = w_2\}$  – равенство приоритетов характеристик  $T$  и  $P$ ;  $I_2 = \{w_1 > w_2\}$  – приоритет  $T$  над  $P$ ;  $I_3 = \{w_1 < w_2\}$  – приоритет  $P$  над  $T$ ) и вычислялись три набора индексов соответственно:  $H(q; I)_{T=P}, H(q; I)_{T>P}$  и  $H(q; I)_{T<P}$ . Оценки (математические ожидания) этих индексов производились с использованием программы, разработанной сотрудниками лаборатории моделирования и диагностики геосистем факультета географии и геоэкологии СПбГУ Л.В. Александровой, В.Ю. Васильевым, А.Н. Огурцовым, и представляющей собой модификацию сертифицированной системы поддержки принятия решений АСПИД-3W [Хованов, 1996].

Для верификации индекса  $H(q; I)$  вычислялись традиционные индексы Де-Мартона  $\alpha^M$  и коэффициент стока  $\alpha$  для 132 озерных бассейнов, расположенных на территории Кольского полуострова, Карелии, северо-западных и нечерноземных областей Российской Федерации, стран Балтии и Беларуси. При этом использовались средние многолетние значения, снятые с карт [Мировой водный баланс..., 1974] и отнесенные к условным центрам тяжести озерных бассейнов. Напомним, что индекс Де-Мартона  $\alpha^M$  представляет собой отношение годовой суммы осадков ( $P$ , мм) к средней годовой температуре воздуха ( $T$  °C + 10 °C) и позволяет различать два прямо противоположных по степени увлажнения территории типа климата – гумидный ( $\alpha^M \geq 15$ ) и аридный ( $\alpha^M < 15$ ). Особенности временной изменчивости индекса  $\alpha^M$  в XX столетии для бассейна Ладожского озера и его составных частей (водосборы озер Сайма, Онежского, Ильмень) описаны в работе [Мякишева, 2010].

Коэффициент стока  $\alpha$  показывает, какая часть выпавших осадков стекает в речную сеть ( $\alpha = Q / P$ , где  $Q$  – речной сток). При изменении  $\alpha$  от 0,5 до 0,6 фиксируется зона тундры и арктических пустынь, а также зона влажных экваториальных лесов. При изменении  $\alpha$  от 0,3 до 0,5 фиксируется лесная зона; при изменении  $\alpha$  от 0,05 до 0,3 – зона лесостепей и степей; при изменении  $\alpha$  от 0,01 до 0,05 – зона полупустынь; при  $\alpha < 0,01$  – зона пустынь [Мировой водный баланс..., 1974].

**Результаты**

Сопоставление распределения по территории значений индекса  $H(q; I)$ , рассчитанных при разных вариантах задания дополнительной ннн-информации  $I$ , с распределением значений индекса Де-Мартона  $\alpha^M$  и коэффициента стока  $\alpha$  показало, что в условиях современного климата следует отдавать предпочтение равенству приоритетов  $T$  и  $P$  или приоритету  $T$  над  $P$ . В этих случаях значения коэффициентов регрессии  $R^2$  в уравнениях связи между  $H(q; I)$  и  $\alpha^M$  и  $H(q; I)$  и  $\alpha$  достигают максимальных величин (рис. 1–3).

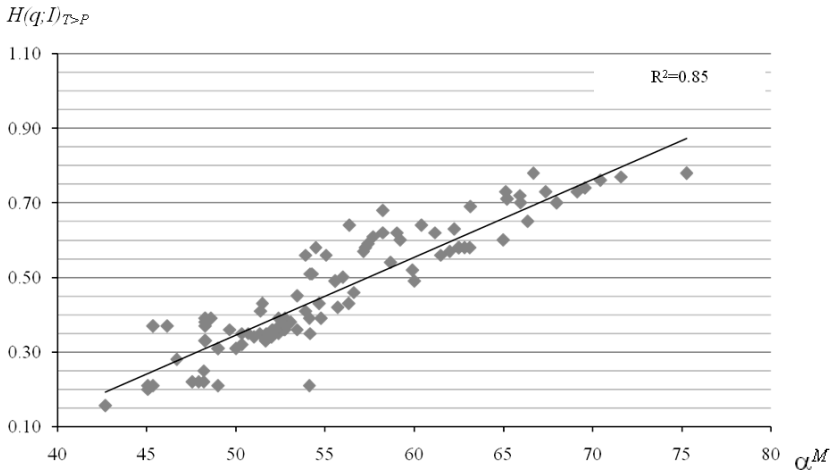


Рис. 1. График связи индекса Де-Мартона и индекса увлажненности  $H(q; I)_{T>P}$  для всего района

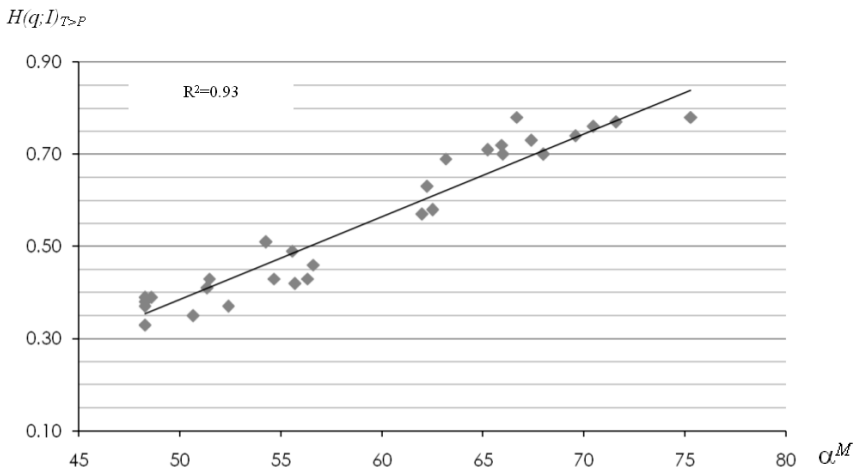


Рис. 2. График связи индекса Де-Мартона и индекса увлажненности  $H(q; I)_{T>P}$  для Кольского полуострова и нечерноземных областей России

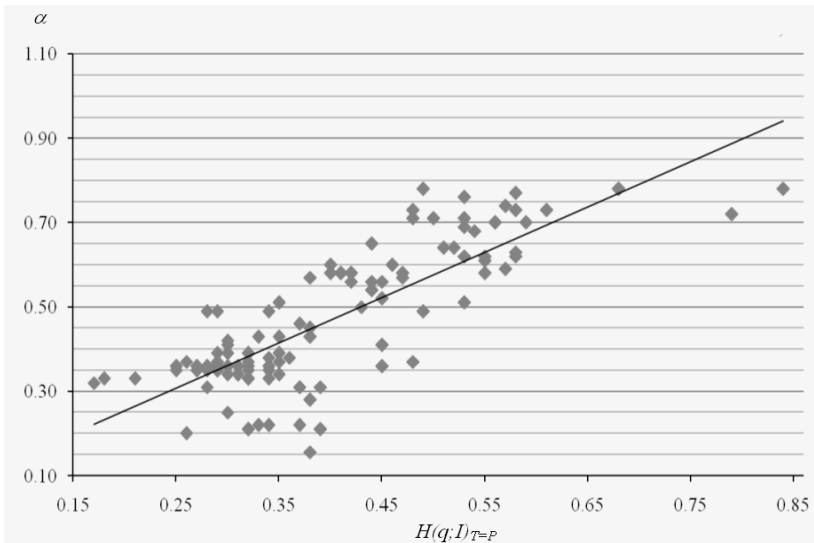


Рис. 3. График связи коэффициента стока и индекса увлажненности  $H(q; I)_{T=P}$  для всего района

Для распределения по территории исследуемого региона индекса увлажненности  $H(q; I)_{T>P}$  характерна определенная географическая закономерность. Высокие значения индекса  $H(q; I)_{T>P}$ , превышающие квантиль  $H(q; I)_{0,75} = 0,58$ , характерны для большинства озерных бассейнов, расположенных на возвышенных территориях Кольского полуострова, Карелии и северо-запада России, а низкие значения индекса, не превышающие квантиль  $H(q; I)_{0,25} = 0,35$  – для озерных бассейнов низменных территорий стран Балтии, Беларуси и Псковской области. Для остальной территории значения индекса  $H(q; I)_{T>P}$  находятся в пределах интерквартильного расстояния.

Районирование, выполненное по индексу увлажненности  $H(q; I)_{T>P}$ , в общих чертах совпадает с районами, выделенными по индексу Де-Мартона  $\alpha^M$  и коэффициенту стока  $\alpha$ . Это связано с тем, что индексы достаточно хорошо согласуются между собой. Так, коэффициент детерминации ( $R^2$ ), рассчитанный для всего региона исследований, описывающий связь индексов  $\alpha^M$  и  $H(q; I)_{T=P}$ , составляет 0,65, а  $R^2$ , описывающий связь индексов  $\alpha^M$  и  $H(q; I)_{T>P}$ , увеличивается до 0,85. Величина коэффициента детерминации  $R^2$ , описывающая связь индексов  $\alpha^M$  и  $H(q; I)_{T>P}$  для озерных бассейнов Кольского полуострова и нечерноземных областей России, увеличивается до 0,93. Связь между коэффициентом стока  $\alpha$  и индексом  $H(q; I)$  также высока. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ), рассчитанный для всего региона в целом, составляет 0,7.

Наличие связи между индексом  $H(q; I)$  и коэффициентом стока  $\alpha$  позволяет рассчитать шкалу ландшафтно-географического и климатического районирования по индексу  $H(q; I)$ . В соответствии с этой шкалой выделяются следующие зоны:

- тундра (зона избыточного увлажнения)  $H(q; I) \geq 0,8$ ;

- тайга (зона избыточного увлажнения)  $0,8 > H(q; I) \geq 0,6$ ;
- смешанные леса (зона достаточного увлажнения)  $0,6 > H(q; I) \geq 0,5$ ;
- широколиственные леса (зона достаточного увлажнения)  $0,5 > H(q; I) \geq 0,4$ ;
- лесостепь (зона умеренного увлажнения)  $0,4 > H(q; I)$ .

Некоторые озерные бассейны Кольского полуострова (Сумозеро, Пулозеро, М. Колсиярв, Б. Колсиярв, Умбозеро, Вялозеро) относятся к зоне тундры. Большая часть исследуемой территории расположена в лесной зоне, которая включает в себя тайгу, смешанные и широколиственные леса. Так, озерные бассейны Кольского полуострова, Карелии, северо-запада России, а также Вологодской области расположены, главным образом, в зоне тайги. Озерные бассейны юга равнинной территории Карелии (Сямозеро, Гимольское, Палье, Водлозеро), Ярославской (Неро, Сенеж, Плещеево), Костромской (Галичское, Чухломское) и Тверской (Селигер) областей принадлежат к зоне смешанных лесов. Озерные бассейны стран Балтии и Беларуси, а также отдельные бассейны Псковской (Вел. Вода, Платялю, Щирское, Лубенское, Чудское, Дубец), Ленинградской (Самро, Череменецкое) и Новгородской (Вялец, Коробожа, Торбино, Ильмень) областей относятся к зоне широколиственных лесов. К лесостепной зоне можно отнести некоторые бассейны юга Беларуси (Белое, Выгоновское, Червоное, Мядель).

### Выводы

1. Индекс  $H(q; I)$ , смоделированный в условиях дефицита информации и неопределенности расстановки приоритетов оценивания, адекватно отражает географические закономерности распределения увлажненности исследуемого региона – ее увеличение с юга на север и с ростом высоты местности.
2. Для зон избыточного, достаточного и умеренного увлажнения индекс  $H(q; I)$  хорошо согласуется с традиционными индексами Де-Мартона  $\alpha^M$  и коэффициентом стока  $\alpha$ .
3. Расчет оценок весовых коэффициентов индексов  $H(q; I)$  по «обучающей выборке» – озерным бассейнам, ранжированным по степени их увлажненности, в дальнейшем возможно повысит тесноту связей между рассмотренными индексами.
4. Моделирование индексов  $H(q; I)$  при разных вариантах задания информации  $I$  позволит получить разные сценарии изменений увлажненности территории в зависимости от расстановки приоритетов между характеристиками  $T$  и  $P$ .

### Литература

1. Александрова Л.В., Васильев В.Ю., Дмитриев В.В., Мякишева Н.В., Огурцов А.Н., Терехина Н.В., Третьяков В.Ю., Уфимцева М.Д. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. V. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды урбанизированных территорий // Вестн. СПбГУ. Сер. 7, 2000, вып. 4, № 34.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук, 1996, т. 166, № 11, с. 1145–1170.



3. Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 280 с.
4. Гирс А.А., Кондратович К.В. Методы долгосрочных прогнозов погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 343 с.
5. Дмитриев В.В., Мякишева Н.В., Хованов Н.В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. I. Качество природных вод // Вестн. СПбГУ. Сер. 7, 1996, вып. 3 (№ 21), с. 40–52.
6. Дмитриев В.В., Мякишева Н.В., Третьяков В.Ю., Хованов Н.В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. II. Трофический статус водных экосистем // Вестн. СПбГУ. Сер. 7, 1997, вып. 1 (№ 7), с. 51–67.
7. Дмитриев В.В., Васильев В.Ю., Третьяков В.Ю., Огуцов А.Н. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. IV. Токсическое загрязнение воды, грунтов и влияние поллютантов на удельные скорости обменных процессов в водных экосистемах (статья) // Вестн. СПбГУ. Сер. 7, 1999, вып. 1 (№ 7).
8. 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.
9. Кондратович К.В. Долгосрочные гидрометеорологические прогнозы в Северной Атлантике. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 184 с.
10. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 638 с.
11. Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. – СПб.: изд. РГГМУ. 2009. – 169 с.
12. Мякишева Н.В. Особенности увлаженности бассейнов больших Европейских озер в условиях современного климата // Уч. зап. РГГМУ, 2010, № 11, с. 5–15.
13. Огуцов А.Н., Хованов Н.В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. III. Оценка степени благоприятности природных условий макрорегионов Северо-Запада РФ для жизни людей // Вестн. СПбГУ. Сер. 7, 1997, вып. 2 (№ 14).
14. Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Кочанов С.Ю. Северо-Атлантическое колебание и климат. – СПб.: изд. РГГМУ, 1998.
15. Смирнов Н.П., Воробьев В.Н. Северо-Тихоокеанское колебание и динамика климата в северной части Тихого океана. – СПб.: изд. РГГМУ, 2002.
16. Смирнов Н.П., Сарухян Э.И., Розанова И.А. Циклонические центры действия атмосферы Южного полушария и изменения климата. – СПб.: изд. РГГМУ, 2004.
17. Хованов Н.В. АСПИД – система квалиметрических методов оценивания в условиях дефицита информации качества сложных технических объектов // Методология и практика оценивания качества продукции. – Л.: ЛДНТП, 1988, с. 56–61.
18. Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. – СПб.: изд. СПбГУ, 1996.
19. Хованов К.Н., Хованов Н.В. Система поддержки принятия решений АСПИД-3W (Анализ и Синтез Показателей при Информационном Дефиците). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 960087 от 22.03.1996. Российское агентство по правовой охране программ для ЭВМ, баз данных и топологии интегральных микросхем. – М.: РосАПО, 1996.
20. Хованов Н.В. Оценка сложных объектов в условиях дефицита информации. К столетию метода сводных показателей А.Н. Крылова // Труды 8-й международной научной школы «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах». Санкт-Петербург, 24–28 июня 2008 г. – СПб.: ИПМАШ РАН, 2008, с. 18–28.
21. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 568 с.
22. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 308 с.
23. Nicholson S.E. An analysis of the ENSO signal in the tropical Atlantic and western Indian oceans // J. Climatology, 1997, vol. 17, p. 345–375.