

УДК 556.16.048 (476)

Волчек А.А., Парфомук С.И.

ГРУППИРОВКА ОЗЕР БЕЛАРУСИ И ПОЛЬШИ ПО УСЛОВИЯМ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ВОДЫ

Введение. Определение характерных пространственно-временных закономерностей является основой районирования территории по условиям формирования уровня воды и разработки прогнозов (сценариев) изменения уровня. Корректно выполненное районирование позволяет систематизировать количественную и качественную информацию об изменчивости различных гидрологических составляющих.

Ранее авторами выполнено районирование территории Беларуси по условиям колебаний годового стока, выделено 3 гидрологических района [1]. В данной работе предпринята попытка определения однородных гидрологических районов (групп озер) Беларуси и Польши по условиям формирования временной изменчивости уровня воды в озерах.

Целью настоящей работы является выявление закономерностей периодичности колебаний средних годовых уровней воды озер северо-восточной части Польши и Беларуси.

Исходные данные и методика расчета. В качестве исходных данных использованы уровни 25 озер (9 – на территории Беларуси, 16 – на территории Польши) с единым периодом наблюдений – с 1956 по 2010 г. включительно, т.е. 55 лет.

В Польше насчитывается около 7 тыс. озер площадью водного зеркала более 1 га. По плотности озер в Европе Польша занимает

второе место после Финляндии. Особенно ярко выраженным озерным краем является северо-восточная часть Польши, где озера составляют примерно 10 % территории. В Беларуси насчитывается около 10 тыс. озер, площадь водного зеркала которых составляет 2000 км² и объем воды 6–7 км³.

Материалом для исследования озер Польши послужили данные многолетних инструментальных наблюдений за уровнем воды на 16 озерах: 3 озера расположено в Великом Польском Поозерье, 4 – в Поморском Поозерье и 9 – в Мазурском Поозерье. Материалом для исследования озер Беларуси послужили данные многолетних инструментальных наблюдений за уровнем воды, выполненных Гидрометеослужбой на 9 крупнейших озерах Беларуси, расположенных в Белорусском Поозерье и Белорусском Полесье. При отборе озер во внимание принималось два критерия, – полнота данных наблюдений и отсутствие антропогенного влияния. В настоящее время практически все водосборы подвержены антропогенным нагрузкам в той или иной степени, поэтому гидрологический режим рассматриваемых озер является квазистационарным.

Характеристики озер и морфометрические особенности их котловин, влияющие на высоту подъема уровня воды – наличие четко выраженной пологой зоны мелководий (литорали), пологих склонов и развитой поймы представлены в таблицах 1–2.

Таблица 1. Основные географические и морфометрические характеристики исследованных озер

Озёра	Отметка нуля поста, м БС	Координаты		Площадь зеркала, км ²	Объем озера, Млн. м ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Показатель открытости	Коэффициент ёмкости	Удельный водосбор
		широта	долгота							
Белое	122,2	53°52'	23°03'	4,53	41,72	30,0	9,21	0,49	0,29	8,10
Хажиковске	120,0	53°47'	17°30'	13,36	134,5	30,5	10,1	1,33	0,32	68,4
Дрвенцке	94,8	53°43'	19°53'	7,80	50,14	22,0	6,43	1,21	0,26	130,1
Элцке	119,9	53°49'	22°21'	3,85	57,42	55,8	14,9	0,26	0,27	254,6
Езёрак	99,2	53°42'	19°37'	31,53	141,59	12,9	4,49	7,02	0,32	9,99
Нидзке	117,9	53°36'	21°36'	17,50	113,9	23,7	6,51	2,69	0,26	9,83
Остшицке	160,1	54°15'	18°06'	2,96	20,79	21,0	7,02	0,42	0,32	67,9
Райгродзке	118,4-118,6	53°46'	22°38'	14,99	142,6	52,0	9,51	1,58	0,18	49,4
Рось	114,4	53°40'	21°54'	18,09	152,9	31,8	8,45	2,14	0,25	167,1
Студзеничне	123,4	53°52'	23°07'	2,44	22,07	30,5	9,05	0,27	0,28	10,0
Вигры	131,9	54°03'	23°04'	21,15	336,7	73,0	15,9	1,33	0,21	23,0
Бискупиньске	78,6	52°48'	17°45'	1,07	6,40	13,7	5,98	0,18	0,40	73,7
Гопло	76,8-77,2	52°36'	18°22'	21,22	78,50	16,6	3,70	5,74	0,22	66,4
Ямно	0,1	54°17'	16°08'	22,32	31,53	3,9	1,41	15,80	0,36	22,5
Лебско	0,2	54°43'	17°25'	70,20	117,5	6,3	1,67	41,94	0,25	25,7
Славске	56,9	51°54'	16°01'	8,23	42,66	12,3	5,18	1,59	0,42	24,4
Сенно	142,1	54°49'	29°42'	3,13	26,83	31,5	8,57	0,37	0,27	21,7
Лукомское	163,5	54°39'	29°06'	37,71	249,0	11,5	6,60	5,71	0,57	4,75
Нещердо	147,0	55°57'	29°03'	24,62	84,72	8,1	3,44	7,15	0,42	5,81
Освейское	128,4	56°01'	28°07'	52,80	104,0	7,5	1,97	26,81	0,27	3,90
Дривяты	129,5	55°38'	27°01'	36,14	223,5	12,0	6,18	5,84	0,51	11,7
Мястро	163,7	54°52'	26°51'	13,10	70,10	11,3	5,35	2,45	0,48	9,16
Нарочь	163,7	54°53'	26°41'	79,62	710,0	24,8	8,92	8,93	0,36	2,50
Выгонощанское	151,0	52°39'	25°56'	26,00	32,10	2,3	1,23	21,06	0,52	2,35
Червоное	134,5	52°23'	27°56'	40,82	27,35	2,9	0,67	60,92	0,24	4,58

Волчек Александр Александрович, д.г.н., профессор, декан факультета инженерных систем и экологии Брестского государственного технического университета.

Парфомук Сергей Иванович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой информатики и прикладной математики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология

Таблица 2. Основные биологические и морфометрические характеристики исследованных репрезентативных озёр

Озёра	Тип котловины	Площадь водосбора, км ²	Проточность	Генетический тип
Белое	ложбинная	36,7	слабопроточное	мезотрофное
Хажиковске	ложбинная	914	слабопроточное	эвтрофное
Дрвенце	сложная	1015	слабопроточное	эвтрофное
Элцке	сложная	980	проточное	эвтрофное
Езёрак	сложная	315	слабопроточное	эвтрофное
Нидзке	сложная	172	слабопроточное	эвтрофное
Остшицке	сложная	201	проточное	эвтрофное
Райгородзке	сложная	740	слабопроточное	мезотрофное
Рось	сложная	3022	слабопроточное	эвтрофное
Студзеничне	ложбинная	24,4	слабопроточное	мезотрофное
Вигры	сложная	487	слабопроточное	мезотрофное
Бискупиньске	ложбинная	78,9	проточное	эвтрофное
Гопло	сложная	1408	проточное	эвтрофное
Ямно	прибрежная	503	слабопроточное	эвтрофное
Лебско	прибрежная	1801	слабопроточное	эвтрофное
Славске	ложбинная	201	слабопроточное	эвтрофное
Сенно	ложбинная	67,9	проточное	мезотрофное
Лукомское	подпрудная	179	проточное	эвтрофное
Нещердо	сложная	143	проточное	эвтрофное
Освейское	подпрудная	206	проточное	эвтрофное
Дривяты	подпрудная	423	проточное	эвтрофное
Мястро	подпрудная	120	проточное	эвтрофное
Нарочь	подпрудная	199	проточное	мезотрофное
Выгонощанское	остаточная	61,1	проточное	эвтрофное
Червоное	остаточная	187	слабопроточное	дистрофирующее

В частности представлено географическое положение озер посредством географических координат (широта, долгота и высота над уровнем моря), что позволяет составить общее представление об основных чертах режима озера. Максимальное расстояние между озерами Польши с запада на восток составляет 788 км (оз. Славске (16°01' В.Д.) и оз. Студзеничне (23°07' В.Д.)) и с юга на север 313 км (оз. Славске (51°54' С.Ш.) и оз. Лебско (54°43' С.Ш.)). Для белорусских озер расстояние между озерами с запада на восток составляет 418 км (оз. Выгонощанское (25°56' В.Д.) и оз. Сенно (29°42' В.Д.)) и с севера на юг 403 км (оз. Освейское (56°01' С.Ш.) и оз. Червоное (52°23' С.Ш.)). Максимальное расстояние между рассматриваемыми озерами с запада на восток составляет 1519 км (оз. Славске (16°01' В.Д.) и оз. Сенно (29°42' В.Д.)) и с юга на север 457 км (оз. Славске (51°54' С.Ш.) и оз. Освейское (56°01' С.Ш.)). Максимальная отметка нуля поста составляет 163,7 м БС (оз. Нарочь и оз. Мястро) и минимальная – 0,1 м БС (оз. Ямно).

Площади зеркала рассматриваемых озер колеблются от 1,07 км² (оз. Бискупиньске) до 79,62 км² (оз. Нарочь), при средней площади водного зеркала 23,01 км². Для польских озер эти показатели колеблются от 1,07 км² (оз. Бискупиньске) до 70,20 км² (оз. Лебско), при средней величине 16,33 км². Для белорусских озер эти показатели колеблются от 3,13 (оз. Сенно) до 79,62 км² (оз. Нарочь), средняя величина 34,88 км².

Объём воды в озерах колеблется от 6,40 млн. м³ (оз. Бискупиньске) до 710,0 млн. м³ (оз. Нарочь), при среднем объёме воды всех рассматриваемых озер – 121 млн. м³. Для озер Польши объёмы воды колеблются в пределах от 6,40 (оз. Бискупиньске) до 336,7 млн. м³ (оз. Вигры), средняя величина 93,2 млн. м³. Для озер Беларуси эти показатели равны: 26,83 млн. м³ (оз. Сенно), 710,0 млн. м³ (оз. Нарочь), 170 млн. м³ соответственно.

Максимальная глубина воды в озерах колеблется от 2,3 м (оз. Выгонощанское) до 73,0 м (оз. Вигры), при средней максимальной глубине воды 21,9 м. Для озер Польши максимальная глубина воды в озере колеблется в пределах от 3,90 м (оз. Ямно) до 73,0 м (оз. Вигры), при средней максимальной глубине воды 27,3 м. Для озер Беларуси эти показатели равны: 2,3 м (оз. Выгонощанское), 31,5 м (оз. Сенно), 12,4 м соответственно.

Средняя глубина воды в озерах, определяемая как отношение объёма воды в озере к площади поверхности озера, колеблется от

0,67 м (оз. Чырвоное) до 15,92 м (оз. Вигры), при средней величине глубины воды 6,50 м. Для озер Польши средняя глубина воды в озерах колеблется в пределах от 1,41 (оз. Ямно) до 15,92 м (оз. Вигры), при средней величине глубины воды 7,47 м. Для озер Беларуси эти показатели равны: 0,67 м (оз. Чырвоное), 8,92 м (оз. Нарочь), 4,77 м, соответственно.

Показатель открытости, определяемый как отношение площади озера к его средней глубине, колеблется от 0,18 (оз. Бискупиньске) до 60,92 (оз. Чырвоное), при средней величине 8,93. Для озер Польши этот показатель колеблется в пределах от 0,18 (оз. Бискупиньске) до 41,94 (оз. Лебско), при средней величине 5,25. Для озер Беларуси – 0,37 (оз. Сенно), 60,92 (оз. Чырвоное), 15,47, соответственно.

Коэффициент ёмкости, определяемый как отношение средней глубины к максимальной глубине, колеблется от 0,18 (оз. Райгородзке) до 0,57 (оз. Лукомское), при средней величине 0,34. Для озер Польши этот показатель колеблется в пределах от 0,18 (оз. Райгородзке) до 0,44 (оз. Бискупиньске), при средней величине 0,30. Для озер Беларуси – 0,23 (оз. Чырвоное), 0,57 (оз. Лукомское), 0,41 соответственно.

Удельный водосбор, определяемый как отношение площади водосбора озера к площади зеркала озера, колеблется от 2,35 (оз. Выгонощанское) до 254,55 (оз. Элцке), при средней величине 43,10. Для озер Польши этот показатель колеблется в пределах от 8,10 (оз. Белое) до 254,55 (оз. Элцке), при средней величине 63,19. Для озер Беларуси 2,35 (оз. Выгонощанское), 21,69 (оз. Сенно), 7,38 соответственно.

Все озера имеют высокую тесноту связи с гидрографической сетью. Площадь водосбора изменяется от 24,4 км² (Студзеничне) до 3022 км² (Рось), при средней величине 539 км². Для озер Польши средняя величина водосборов составляет 744 км². Для озер Беларуси площади водосборов колеблется от 61,1 км² (оз. Выгонощанское) до 423 км² (оз. Дривяты), при средней величине водосбора 176 км².

Типы котлованов озер в основном подпрудные, но встречаются и ложбинные, остаточные. Озера по проточности слабопроточные или проточные, а по генетическому типу – эвтрофные и мезотрофные.

В связи с тем, что в рядах наблюдений имелись пропуски, а также для приведения временных рядов к единому расчетному периоду, нами выполнены расчеты по их восстановлению и продлению. Для этих целей использовался множественный регрессионный анализ. В частности для оз. Лукомское выполнено продление временно-го ряда с 1956 по 1974 гг., оз. Выгонощанское – с 1956 по 1964 гг., оз. Мястро – с 1956 по 1961 гг., оз. Чырвоное – с 1956 по 1957 гг. и

оз. Дривяты – за 1956 г. Для оз. Ямно восстановлено значение уровня воды за 1985 г. Для оз. Лебско в средние значения с 1956 по 1969 г. добавлено 100 см, т.к. на эту величину увеличился уровень в результате регулирования озера в 1970 г.

Методика объединения озер в группы основана на анализе сходства изображений спектральной плотности уровней воды [2]. Спектральная плотность рассчитывается для всех озер за одинаковый интервал времени по формуле [3]

$$S(w) = \frac{1}{\pi_0} \int_0^m \lambda(\tau) r(\tau) \cos(w\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $w = 2\pi T$ – круговая частота; T – период; m – максимальный сдвиг при оценке ординат автокорреляционной функции; $\lambda(\tau)$ – сглаживающая функция; $r(\tau)$ – автокорреляционная функция.

В качестве сглаживающей функции $\lambda(\tau)$ применялось корреляционное окно Наттола [3]

$$\lambda(\tau) = \sum_{k=0}^3 a_k \cos[(\pi k \tau) / m], \quad (2)$$

где a_k – весовые коэффициенты ($a_0 = 0,364$; $a_1 = 0,489$; $a_2 = 1,137$; $a_3 = 0,011$).

Окно Наттола использовалось для упрощения выделения типовых спектров, т. к. его применение позволяет снизить величину шумовой компоненты и получить сглаженный спектр.

Максимальный по длительности период, выделяемый на спектре, не должен превышать 1/3 длины ряда. Уровень значимости пиков назначался из нулевой гипотезы H_0 : гидрологический ряд представляет собой «белый шум». Доверительный интервал для выборочного спектра в этом случае определяется выражением [4]:

$$\frac{\chi_{1-\alpha}^2}{\sqrt{2\pi}} < S^* < \frac{\chi_{\alpha}^2}{\sqrt{2\pi}}, \quad (3)$$

где χ^2 – ордината распределения Пирсона; ν – число степеней свободы; $\alpha = 5\%$ – уровень значимости.

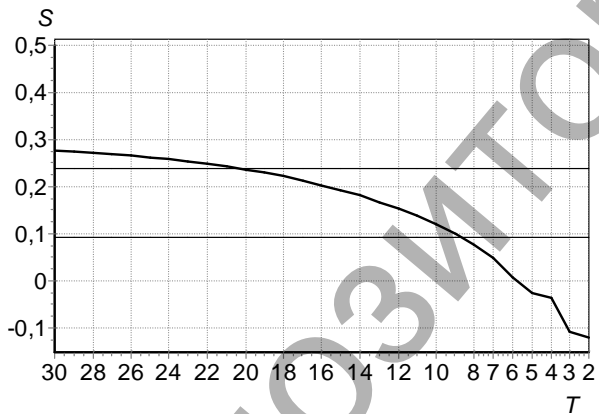
Число степеней свободы для окна Наттола при длине ряда n и максимальном сдвиге m определяется по следующей формуле [3]:

$$\nu = \frac{5,5n}{m}. \quad (4)$$

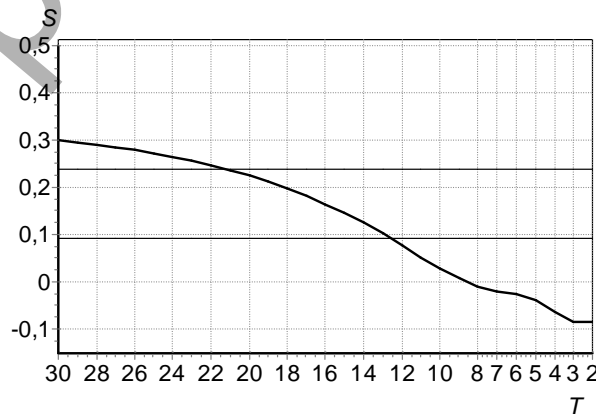
Результаты исследований. В зависимости от вида спектра уровня исследуемые озера Беларуси и Польши разделены на три основных группы. Первая группа спектров представляет собой гладкую кривую без значимых пиков в высокочастотной области. Она обнаружена у большинства исследуемых озер. Типичным представителем этой группы является спектр уровня озера Выгонощанское (рис. 1). В подтверждение к сказанному на рисунке 2 приведены спектры еще 4 уровней озер Беларуси и Польши.



Рис. 1. Типовой для первой группы спектр уровня озера Выгонощанское



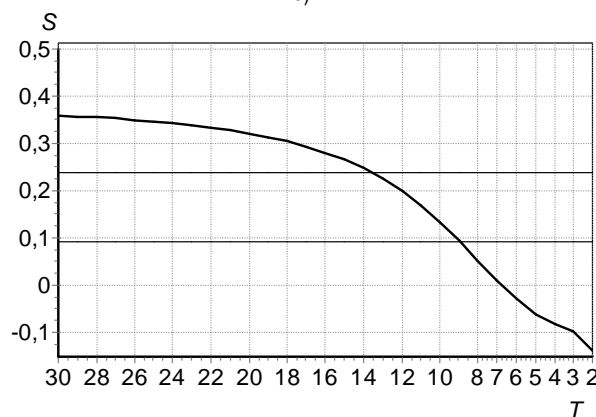
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Наиболее характерные спектры уровней озер для первой группы: а – Нарочь, б – Дрвенцке, в – Элке, г – Вигры

Для спектра уровня озера восточной части Беларуси и озера Студзеничне характерна значимая четырехлетняя гармоника. Типичным представителем этой зоны является спектр уровня озера Лукомское (рис. 3). В подтверждение к сказанному на рисунке 4 приведены спектры уровня 4 озер второй группы.

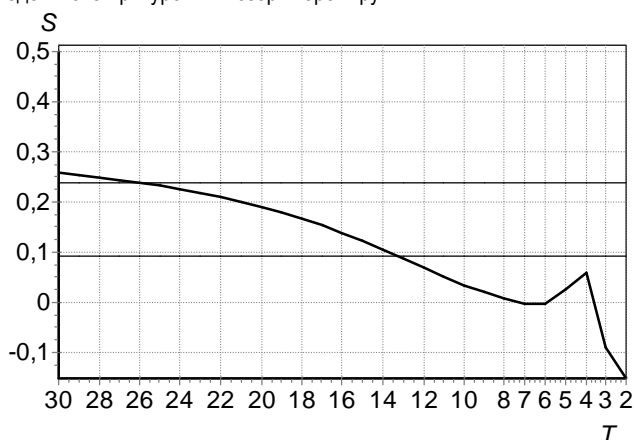


Рис. 3. Типовой для второй группы спектр уровня озера Лукомское

Третья группа представлена озерами из северо-западной части Польши. Данная группа спектров представляет собой кривую с наличием значимого пика трехлетнего колебания. Типичный спектр для этой группы приведен на рисунке 5, соответствующий уровню озера Лебско. На рисунке 6 приведены еще 4 спектра для озер третьей группы.

Объединение озер в группы на анализе сходства изображений спектральной плотности уровней воды способствовало проведению оценки основных статистических параметров. Средние значения коэффициентов вариации (C_v), отношений коэффициентов асимметрии и вариации (C_s / C_v), а также коэффициентов автокорреля-

ции ($r(1)$) для выделенных в отдельные группы озер Беларуси и Польши приведены в таблице 3.

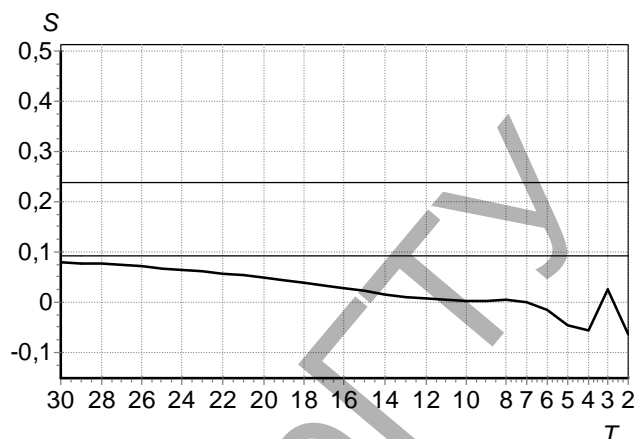
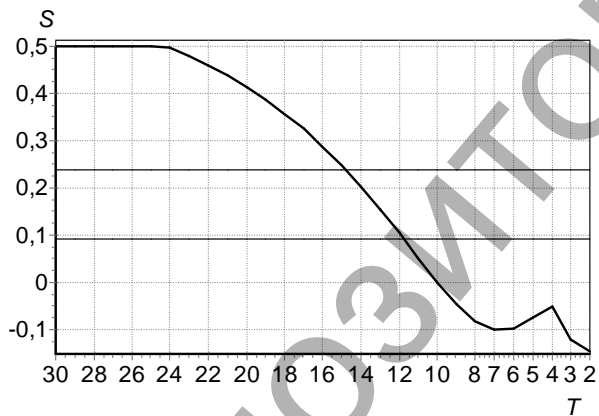


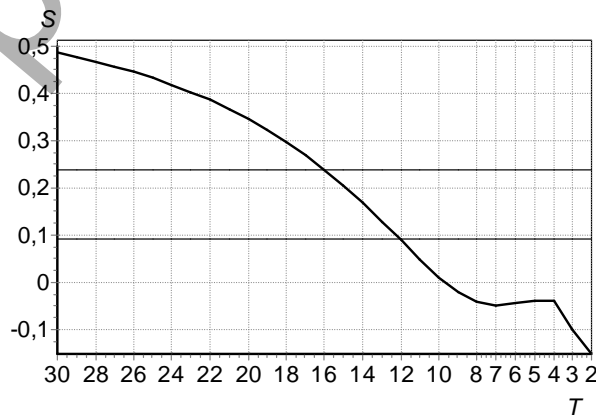
Рис. 5. Типовой для третьей группы спектр уровня озера Лебско

Таблица 3. Основные статистические параметры озер Беларуси и Польши по группам

Номер группы	C_v	C_s / C_v	$r(1)$
I	0,06	-2,1	0,57
II	0,18	-0,4	0,64
III	0,07	0,2	0,49



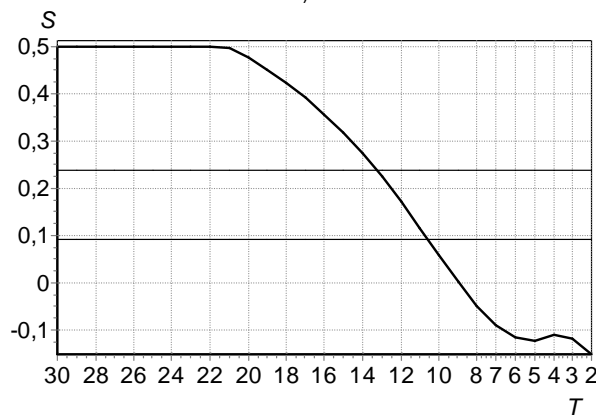
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Наиболее характерные спектры уровней озер для второй группы: а – Сенно, б – Нещердо, в – Червоное, г – Студзеничне

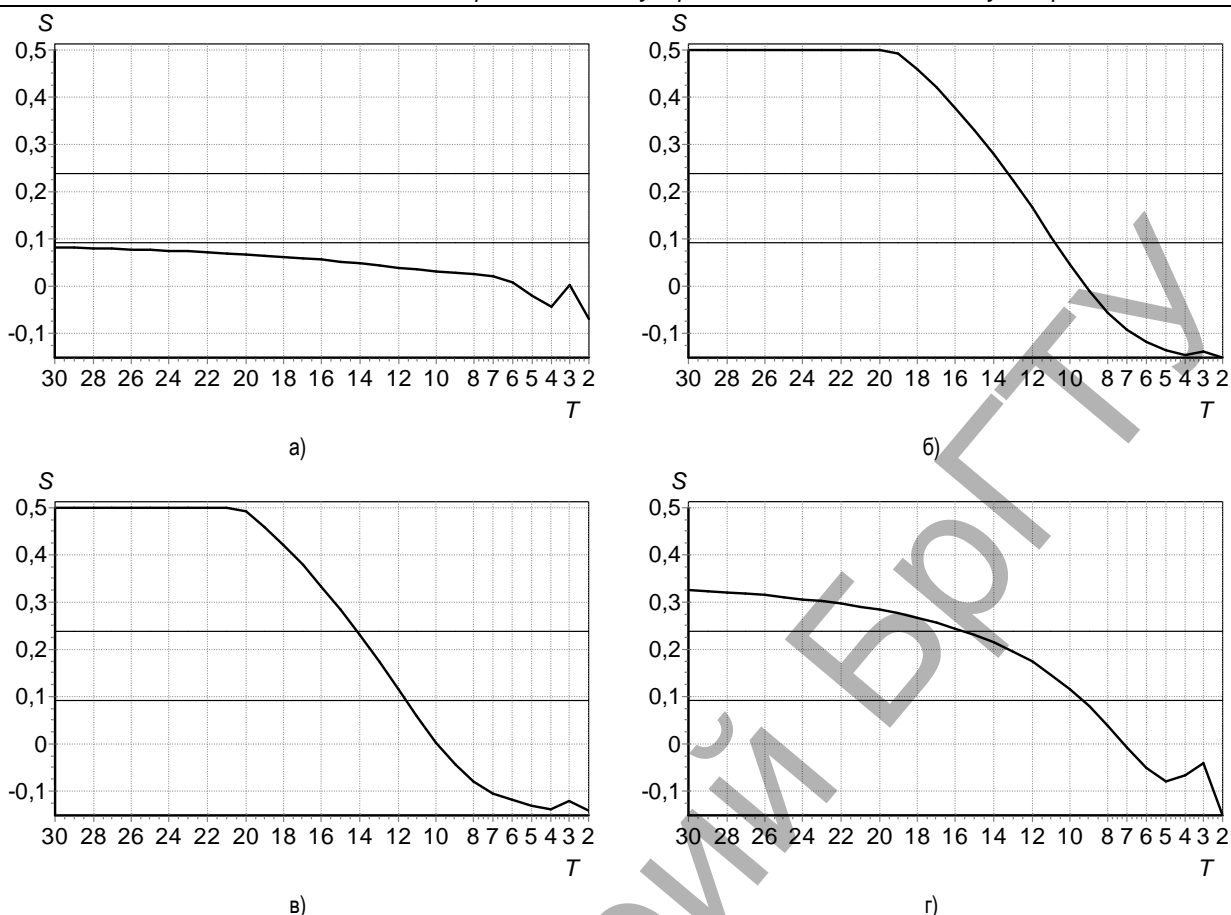


Рис. 6. Наиболее характерные спектры уровней озер для третьей группы: а – Гопло, б – Остщице, в – Ямно, г – Славске

Коэффициенты вариации и автокорреляции имеют наибольшие значения для второй группы озер. Соотношение коэффициентов асимметрии и вариации имеет ярко выраженную тенденцию к возрастанию от первой к третьей группе.

Уровни воды озер в выделенных группах отличаются также мощностью долгопериодных составляющих в спектре. Максимальная «степень покраснения» спектра уровня воды озер наблюдается во второй группе. В первой группе мощность долгопериодных составляющих в спектре ниже, чем во второй. В третьей группе озер «красный шум» наименее выражен.

Заключение. Выполнена первая попытка выделения в отдельные группы озер Беларуси и Польши по характеру колебаний уровня воды на основе анализа сходства спектральной плотности уровней. Выявлено три группы, для которых рассчитаны основные статистические параметры. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования уровня воды неизученных и слабо изученных озер Беларуси и Польши.

VOLCHAK A.A., PARFAMUK S.I. Grouping lakes of Belarus and Poland on the conditions of fluctuating water levels

The first attempt to release separate groups of Belarusian and Polish lakes on the fluctuating water levels on the basis of the similarity of the spectral density levels analysis is performed. Three groups of lakes are selected. Basic statistical parameters are calculated for selected groups. The results can be used to forecast water levels for unexplored and poorly studied lakes in Belarus and Poland.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Логинов, В.Ф. Районирование территории Беларуси по условиям колебания речного стока / В.Ф. Логинов, А.А. Волчек, С.И. Парфомук // Природопользование: сб. научн. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т проблем использования природ. ресурсов и экологии; под ред. И.И. Лиштвана, В.Ф. Логинова. – Минск, 2005. – Вып. 11. – С. 23–28.
2. Дружинин, В.С. Районирование территории Северо-Запада РФ по условиям формирования годового стока / В.С. Дружинин, А.В. Сикан // Водные ресурсы Северо-Западного региона России. – СПб., 1999. – С. 24–29.
3. Марпл-мл., С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл-мл.; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
4. Кайсл, Ч. Анализ временных рядов гидрологических данных / Ч. Кайсл; пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 138 с.

Материал поступил в редакцию 31.03.15