



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экологии и биоресурсов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему Трофический статус озера Теплое

Исполнитель **Аюбов Бахтиёр Тохирович**

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель **д.х.н., профессор кафедры ЭБ**

(Ученая степень, ученое звание)

Фрумин Григорий Тевелевич

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

В. Дроздов

(подпись)

К.Г.Н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Дроздов Владимир Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

«07» июня 2019г.



«

»

()

...», (, ,)
(,)
(, ,)

«

»

_____ ()

_____ «...», _____ (,)

_____ (, ,) _____

«_»_20_.

	.....	3
1.	- -	
	.....	6
2.	-	
	.....	10
2.2	.....	12
2.3	.....	18
2.4	-	22
3.	.....	38
3.1	.....
3.2	-	48
3.3	.....	48
4.	.....	52
4.1		..52
4.2		..54
4.3		..58
4.4	.....	64
	.....	66
	.....	67

， ，
，
， 1 。
， 2025 。
“ ”。
()， 2050 。 2/3
I
— “ ”， “ ” “ ”。
“ ”
， …
… ，
” —
“ I

[1].

(),

[2] (: ,
17.1.1.01 -77,

“

”

，
— ，
()

，
·
·
—
·
—
·
：

1. ， ， ，
 2. ·
 3. ， ·
- ，
1997-2016 .

1. -

-

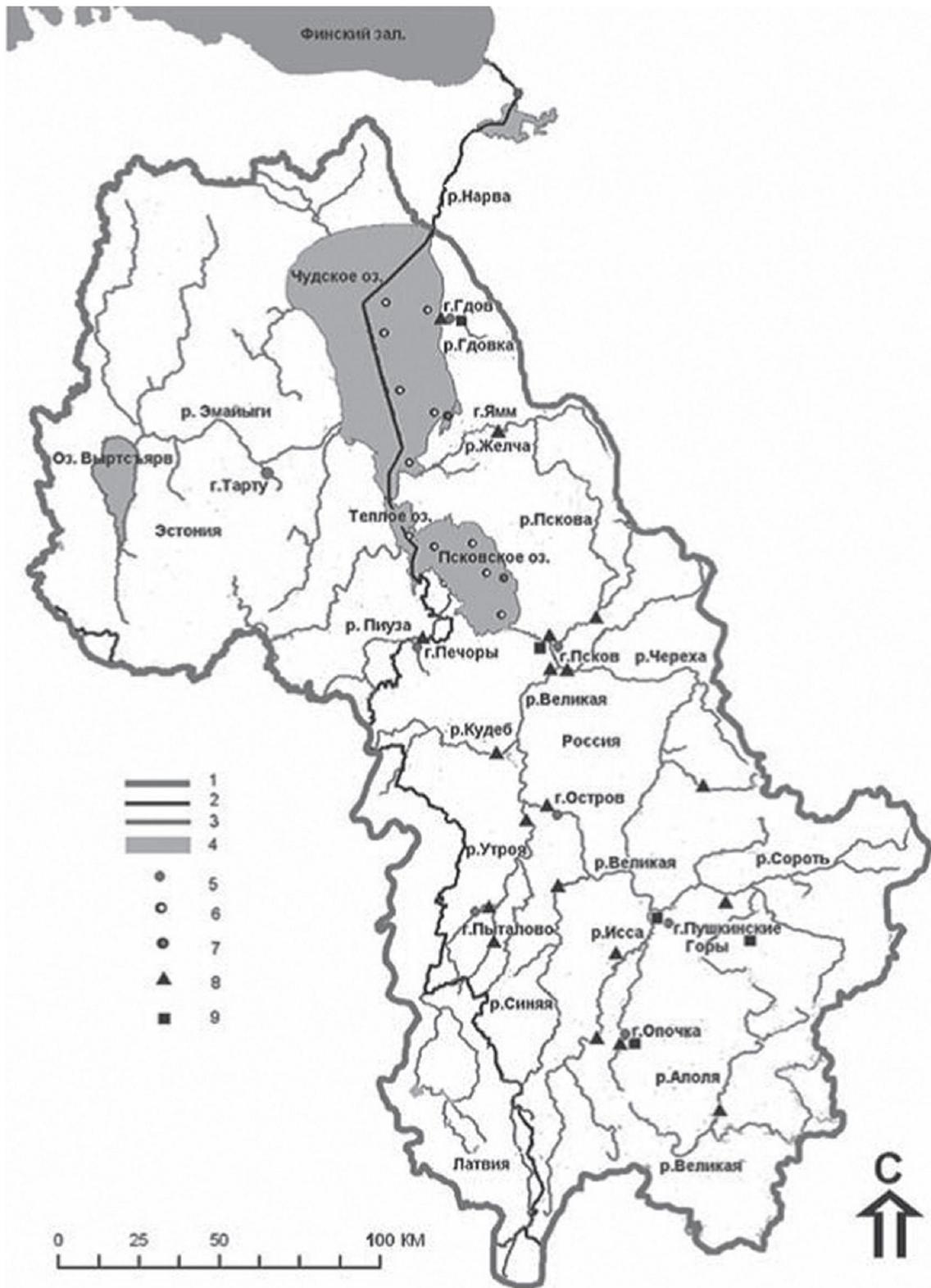
7955 ², - 7,1 ,
- 25,07 ³, - 44 265 ², - 5,6

[3].

(.1,2 .1).



1. -



2. - -

(. Lämmijärv) -

, ²	2611	236	708	3555
, ³	21,79	0,60	2,68	25,07
,	8,3	2,5	3,8	7,1
,	12,9	15,3	5,3	15,3
,	81	30	41	152
,	32	7,9	17	23
,	47	15	20	47
,	260	83	177	520
	55/45	50/50	1/99	44/56

“ ” “ ”

“ ” “ ”

“ ” “ ”

()

,4 8

75 700

10 /

(.4).



4.

[4,5,6].

[7],

2.1.

(18%),

[8].

70%

(10%),

[9].

[15].

(NH_4^+) ,

(N^{2-})

(N^{3-})

(NH_4^+) ,

(NH_4^+)

NH_4^+

(NH_4^+)

NH_4^+ .

NH_4^+

NH_4^+

NH_4^+

NH_4^+

(Nitrogen),



;

(Nitroboron)



2.

(Nitridium)

(Nitridium, Nitroboron),

(



(

/).



N_3^-

N_3^-

/ .

,

,

,

,

/ ,

,

-

,

,

,

,

,

.

,

-

- N_3^- -

[16].

,

-

2.2.

:

: 1)

,

,

,

-

; 2)

,

.

(, (, .)
 , , .)
 , ,
 (, ,) ()
).

[17].

,
 ; , 30 /
 (). , ,
 (),

—
 $N : 10,$
 $N : > 17 -$
 $N : = 10-17 -$
 , “
 — ” [18].

[19].

[20].

“ ”

:

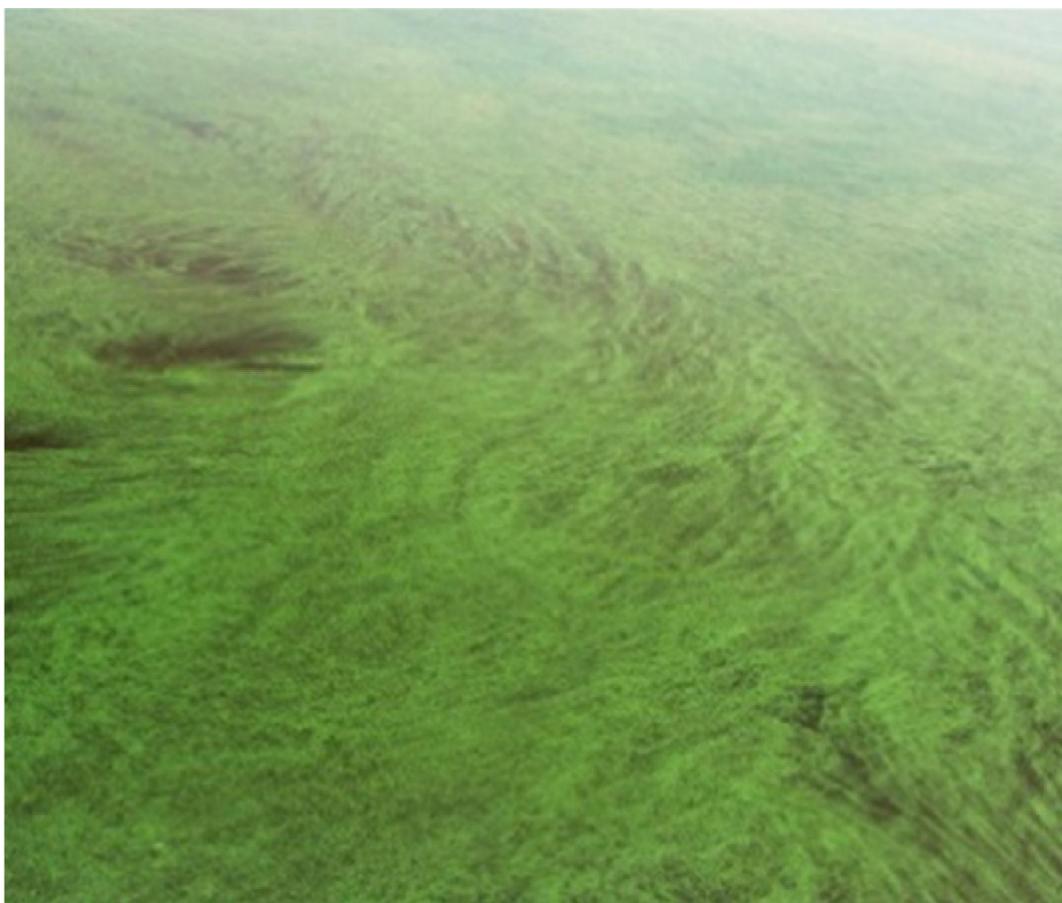
“ ”

1000

(), , (, , .), (, , .).

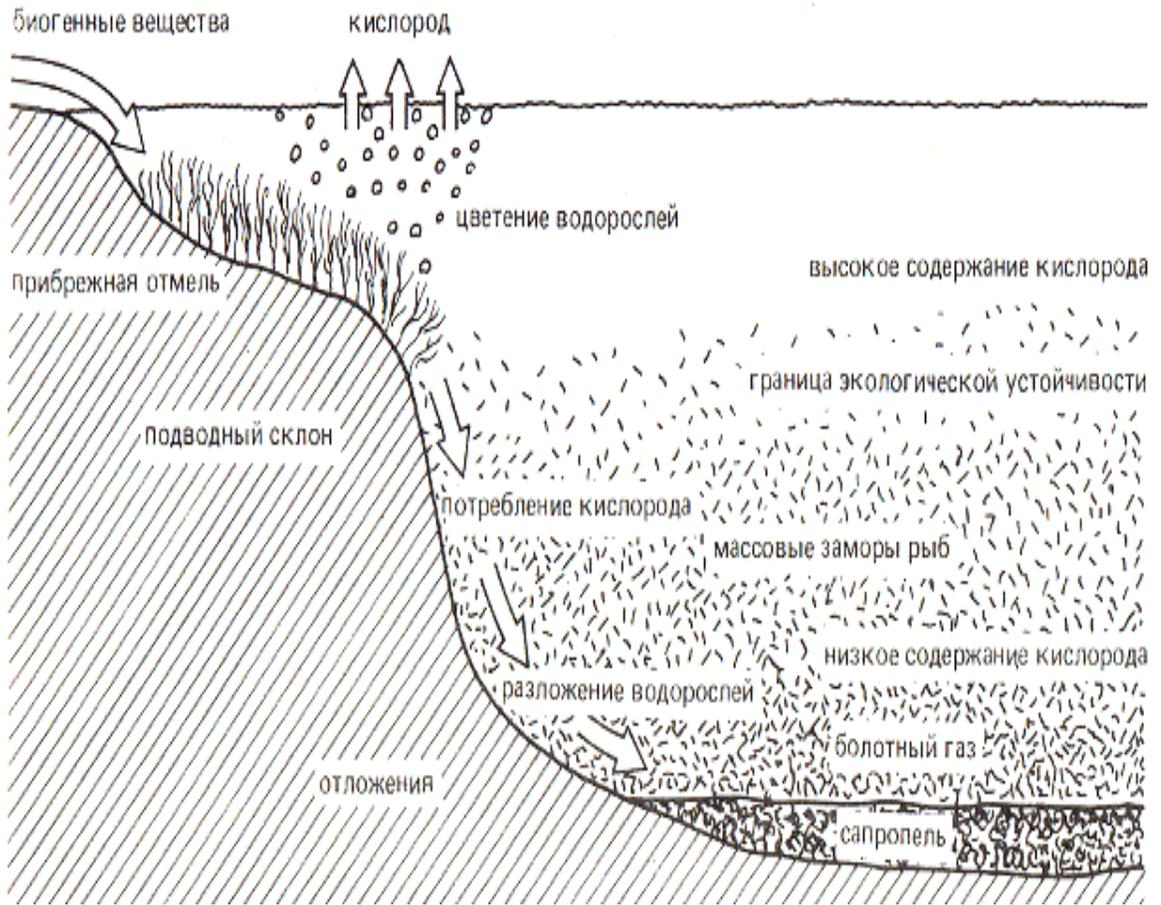
“ ”.

(“ ” , ,) (.5).



5.

13 2008 .



6.

(1400) -

10

: n b n , Mi r stis, h niz m n n,
 N dul ri , Gl tri hi , l s h rium, Gl n dinium, G mn - dinium,
 r mn sium, Rivul rid.

, , .
 , .
 1924-1925 .
 () - : 1927-1928,
 1932-1933 1939-1940 . 1100 18 .
 1934 ,
 400 , 8
 1947 .
 , 1946-1948 . 1998 . -
 , 1960 . -
 , 1970 . - ,
 1975-1976 . - , 1984-1986 .
 2000-2001
 (. , .
). 32 .
 , ,
 2008 .
 16 , ,
 .
 2009

„

« »

” [24].

Mi r stis,

h niz m n n, n b n , Rivul ri .,

Mi r stis, n b n N dul ri .

“*... Mi r stis*
h niz m n n fl s- qu . ,
(ur r us l m ll tus, L th nur r tir stris)” [25].

(. 7,8).
 (. . .),
 [26].

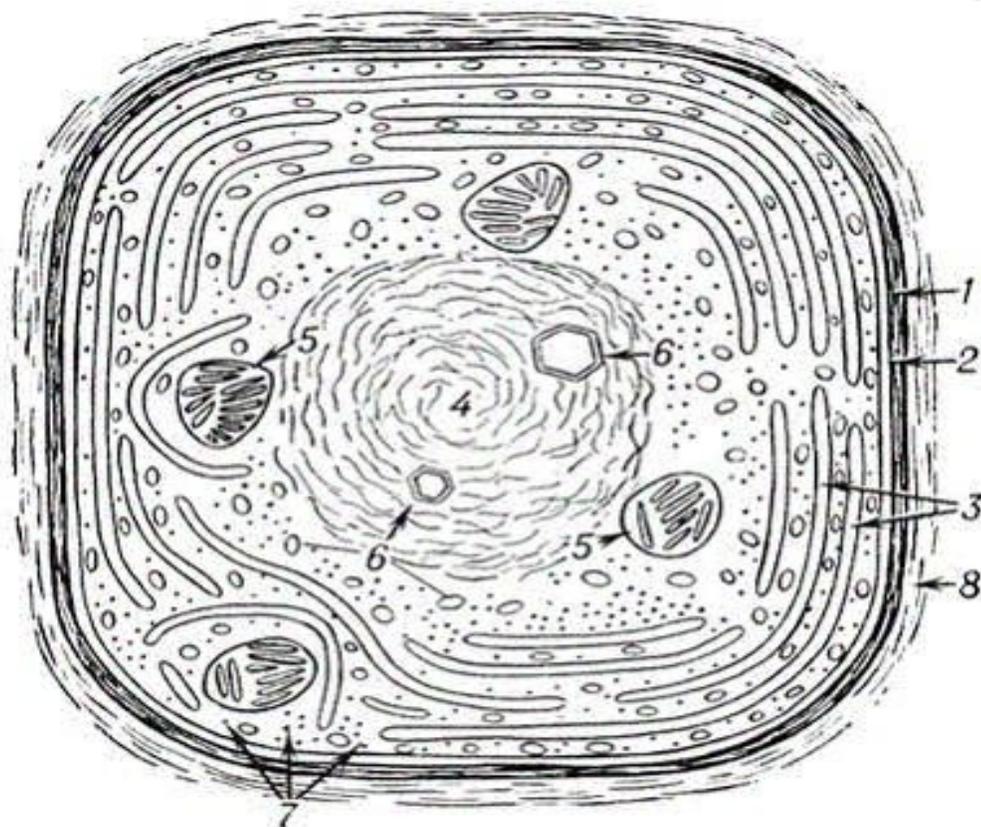


Схема строения клетки синезелёной водоросли: 1 — клеточная стенка; 2 — цитоплазматическая мембрана; 3 — фотосинтезирующие ламеллы; 4 — ядерное вещество (нуклеоплазма); 5 — зёрна цианофицина; 6 — разнообразные включения; 7 — рибосомы; 8 — слой слизи.

7.

40–50%



8. -

(*rr h t*),
 (*hr s h t*), (*hl r h t*) -
 (*n h t*) ,

20 *n h t* ,
Mi r stis rugin s Kütz. *m nd. l nk*, *h niz m n n fl s- qu* (L.) *R lfs.*,
n b n fl s- qu *Br b.*

(-),

ругин с

h. fl s- qu

n b n .

« » (

),

(

),

(4).

().

, - , - .
 (—) ,
 , ,
 .
 (). :
 10 , 4
 . ,
 , ,
 , ,
 , ()
), — (2—3-)
 (- 142,8 /).
 -
 (). : (20 /), , .
 . 23 ,
 (. . .) , 45%
 , 26% 12%
 (17% “ ”).
 (,),
 (th utr hi ti n Ind) 300,
 (100) (80). “ ” [27].

1938 . 1940 .

1942 .

[28].

1924 .,

() ,

“ ”

()

« », ,

(TN), (T) .

()

— , ,

, ,

(, ,

).

(,)

() [33,34].

, ,

« - »

1 « »

(—

(T)

T

, ,

.

()

,

()

... : ... ,
... , ... , ...

[35].

... ,
... [36] « » ...

22 (

...).

... 11 , ...

4 7 [37].

... ,

... :

... ;

... ;

... ,

... ;

... ,

... (,).

... 2-5 ,

... .

[38].

2.

[39]

		-	-	-	-	

1	2	3	4	5	6	7
1		10-30 4-40	30-100 40-150	100-300 150-600	>300 >600	,1960 , 1985
2		0,005- 0,05	0,05-0,5	0,5-5	>5	, 1986
3		0,5-1,0	1,0-2,5	2,5-7,5	>7,5	,1960
4		50-300	250- 1000	600- 8000	>8000	Lik ns, 1975
5	Концентрация хлорофилла «а», мкг/л	0,1-1,0 <1,5 0,1-1,0 6-16	1-10 1,5-10 1-10 16-60	10-100 10-50 >10 >60	>100 >50 - -	Винберг,1960 Трифенова, 1979 Бульон, 1983 Цветкова и др., 1988
6	Максимальная концентрация хлорофилла « » _{max} , мкг/л	<8,0	8-25	25-75	>75	Хендерсон-Селерс, 1990
7	Средняя биомасса фитопланктона за вегетационный	<1,0 <1,0	1-3 1-3	3-10 3-7	>10 >7	Трифенова, 1979 Милиус, Кывасик, 1979

	период, B_f , мг/л					
8	Прозрачность воды по белому диску, H_{sd} , м	>4 11-6 >4 9,9 64-8	2 6 4 4,2 8	<1 <2 <1 <1 2-0,5	- - - - -	Gantrbland, 1931 Thunmark, 1937 Китаев, 1970 Vollenweider, 1980 Carlson, 1977
9	Отношение прозрачности H_{sd} к глубине H	1,01- 2,0	0,51-1,0	0,25-0,5	-	Китаев, 1973
1 0	Трофический индекс Карлсона, TSI, 100 бал.	0-40	40-60	60-80	>80	Carlson, 1977
1 1	Индекс трофности, ИТ	20-40	40-60	60-80	>80	Милиус, Кывасик, 1979
1 2	Ихтиомасса, г/м ²	<1,25- 2,5	2,5-10	10-40	>40	Китаев, 1984
1 3	Максимальная концентрация общего фосфора, $P_{общ}$ мак, мг/л	8,0	26,7	84,4	1200	Хрисанов, Осипов, 1993
1 4	Концентрация общего фосфора, $P_{общ}$, мкг/л	5-20	5-50	<100	-	Романенко, 1985
1 5	Максимальная концентрация общего азота,	661	753	1875	722444	Хрисанов, Осипов, 1993

	$N_{\text{Общ}}$, max, мг/м ³					
1 6	Концентрация общего азота, $N_{\text{Общ}}$, мкг/л	5-80	80-500	500- 1500	-	Романенко, 1985
1 7	Отношение концентраций N:P	30-40	25-30	15-25	12-15	Алекин и др., 1985
1 8	Концентрация минерального фосфора, PO_4 , мгP/л	<0,01	0,01- 0,02	>0,02	-	Thomas, 1959
1 9	pH летом	6,9-7,2	7,2-8	8-9,5	-	Романенко, 1985
2 0	Уровень трофности, УТ	2,5-3,5	3,5-4,5	>4,5	-	Цветкова и др., 1988
2 1	pH при 100% насыщении воды кислородом	7,02±0, 33	7,68±0,3 3	8,34±0,3 3	-	Цветкова и др., 1988
2 2	БПК ₅ , мгO ₂ /л	2,3-3,3	3,3-5,5	>5,5	-	Цветкова и др., 1988
2 3	Концентрация растворенного кислорода, % насыщения	95-105	50-155	<50	-	Цветкова и др., 1988
2 4	Концентрация кремния, мгSi/л	0,05- 0,30	0,30- 0,65	>0,65	-	Цветкова и др., 1988

Таблица 3. Классификация критериев трофического статуса [40]

Трофический статус	ТР, мкг/л	Хлорофилл мкг/л		Прозрачность м		ТН мкг/л
		среднее	макс.	среднее	макс.	
		D				
Ультраолиготрофный	<4	<1	<2,5	>12	>6	-
Олиготрофный	<10	<2,5	<8	>6	>3	-
Мезотрофный	10-35	2,5-8	8-25	6-3	3-1,5	-
Эвтрофный	35-100	8-25	25-75	3-1,5	1,5-0,7	-
Гипертрофный	>100	>25	>75	<1,5	<0,7	-
•						
Ультраолиготрофный	<4,0	<1,0	<2,5	>12	>6	-
Олиготрофный	4-10	<2,5	<8	>6	>3	-
Мезотрофный	10-20	2,5-8	8-25	6-3	3-1,5	-
Мезоэвтрофный	20-35	-	-	-	-	-
Эвтрофный	35-100	8-25	25-75	3-1,5	1,5-0,7	-
Гипертрофный	>100	>25	>75	<1,5	<0,7	-
•						
Олиготрофный	<10	<3,5	-	-	-	<350
Мезотрофный	10-30	3,5-9	-	-	-	350-650
Эвтрофный	31-100	9,1-25	-	-	-	651-1200
Гипертрофный	>100	>25	-	-	-	>1200
•						
Олиготрофный	4-10	1-3	-	12-5	-	-
Мезотрофный	10-30	3-8	-	5-2,5	-	-
Эвтрофный	30-100	8-25	-	2,5-1	-	-
Гипертрофный	-	-	-	-	-	-
•						

Олиготрофный	<15	<3	-	>3,96	-	<400
Мезотрофный	15-25	3-7	-	2,43- 3,96	-	400- 600
Эвтрофный	25-100	7-40	-	0,91- 2,43	-	600- 1500
Гипертрофный	>100	>40	-	<0,91	-	>1500

Таблица 4. Граничные средние значения концентрации хлорофилла « » в водоемах разного трофического состояния, мг/м³ [41]

Трофические условия	Сакомото (Sakomoto), 1966 г.	NAS, 1973 г.	Добсон (Dobson) и др., 1974 г.	USEFA, 1974 г.	Раст, Ли (Rast, Lee), 1978 г.
Олиготрофные	0,3-2,5	0-4	0-4,3	<7	0-2
Мезотрофные	1-15	4-10	4,3-8,8	7-12	2-6
Эвтрофные	15-140	>10	>8,8	<12	>6

В качестве прямого индикатора трофического статуса обычно используется концентрация хлорофилла . Хлорофилл ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$) является основным фотосинтетическим пигментом, поэтому измеренное значение его концентрации в пробе воды является репрезентативным индикатором биомассы водорослей. Он является полезной и точной мерой эвтрофирования водоемов и поэтому регулярно используется при измерении “откликов” водоемов на биогенную нагрузку с целью их восстановления. Основная трудность заключается в том, что концентрация хлорофилла увеличивается незначительно при его содержании свыше 100 мг/м³ независимо от увеличения концентрации биогенных веществ, так как самозатенение приостанавливает дальнейший рост первичных продуцентов.

Таблица 5. Фиксированные категории трофического состояния [42]

Трофическое состояние	Среднее поступление фосфора, мг/м ³	Хлорофилл « », мг/м ³		Глубина видимости диска Секки, м	
		среднее содержание	максимальное содержание	среденная	минимальная осреденная
Ультраолиготрофное	≤4,0	≤1,0	<2,5	≥12,0	≥6,0
Олиготрофное	≤10,0	≤2,5	≤8,0	>6,0	≥3,0
Мезотрофное	10-35	2,5-8	8-25	6-3	3-1,5
Эвтрофное	35-100	8-25	25-75	3-1,5	1,5-0,7
Гипертрофное	>100	≥25	>75	<1,5	<0,7

Таким образом, существующие классификации трофического статуса водных объектов ориентированы на разные показатели и их комплексы. Несомненно, было бы крайне полезным совместно опробовать их на ряде водоемов для установления достоверного, наиболее эффективного и дешевого метода определения трофического статуса водоемов. Очевидно, наиболее надежный метод определения эвтрофирования водоемов состоит в отказе от использования фиксированных категорий.

В связи с изложенным, по нашему мнению, определенные перспективы могут быть связаны с разработкой вероятностной оценки трофического статуса водных объектов [43].

Для единообразия оценок трофического статуса озера Теплое были выбраны критерии OECD (глубина видимости диска Секки, среднее содержание фосфора валового, среднегодовая концентрация хлорофилла « »), отношение концентраций азота валового к фосфору валовому (по О.А. Алекину) и

средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период (по И.С. Трифионовой) (табл. 6).

Таблица 6. Критерии трофического статуса озера Теплое

Критерий	Тип трофии			
	олиготрофия	мезотрофия	эвтрофия	гипертрофия
Глубина видимости диска Секки, м	>6	6-3	3-1,5	<1,5
Среднее содержание фосфора валового, мкг/л	<10	10-35	35-100	>100
Отношение концентраций азота валового к фосфору валовому	30-40	25-30	15-25	12-15
Среднегодовая концентрация хлорофилла « », мкг/л	<2,5	2,5-8	8-25	>25
Средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период, мг/л	<1,0	1-3	3-10	>10

3.2.

В работе использован пакет прикладных программ Excel. Для оценки наличия или отсутствия трендов использовались коэффициенты корреляции (r), которые характеризуют тесноту связи между переменными. Теснота связи оценивалась на основе шкалы Чеддока, представленная в табл. 7 [44].

Таблица 7. Шкала Чеддока

Теснота связи	Значение коэффициента корреляции при наличии:	
	Прямая связь	Обратная связь
Слабая	0,1 – 0,3	(-0,1) – (-0,3)
Умеренная	0,3 – 0,5	(-0,3) – (-0,5)
Заметная	0,5 – 0,7	(-0,5) – (-0,7)
Высокая	0,7 – 0,9	(-0,7) – (-0,9)
Весьма высокая	0,9 – 0,99	(-0,9) – (-0,99)

3.3.

В работе был использован массив данных эстонской акватории озера Теплое за период с 1997 г. по 2016 г. Данные были получены при проведении мониторинга озера специалистами Министерства окружающей среды Эстонии.

Массив данных был разделен на три следующие группы: гидрофизический показатель (глубина видимости диска Секки), гидрохимические показатели (среднее содержание фосфора валового, отношение концентрации азота валового к фосфору валовому), гидробиологические показатели (средняя концентрация хлорофилла « a », средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период) (табл. 8-11).

Таблица 8. Динамика гидрофизического показателя (глубина видимости диска Секки)

Год	Глубина видимости диска Секки, м	Год	Глубина видимости диска Секки, м
1997	1,33	2007	0,93
1998	1,20	2008	1,09
1999	1,60	2009	0,95
2000	1,31	2010	1,10
2001	1,09	2011	0,94
2002	0,85	2012	0,91
2003	0,91	2013	0,91
2004	1,08	2014	0,98
2005	1,04	2015	0,95
2006	0,83	2016	0,80

Таблица 9. Динамика гидрохимических показателей (среднее содержание фосфора валового, отношение концентраций азота валового к фосфору валовому)

Год	Среднее содержание фосфора валового, мкг/л	Отношение концентрации азота валового к фосфору валовому
1997	76,7	17,7
1998	65,9	13,9
1999	79,4	10,9
2000	64,1	12,3
2001	79,4	11
2002	100,1	11,3
2003	102,5	9,3
2004	68	12,1

2005	70,1	11,8
2006	102,8	9,7
2007	65,6	19,2
2008	61,7	16,1
2009	72,5	12
2010	62,3	13,8
2011	72,2	14,3
2012	70,4	14,4
2013	74,9	13
2014	69,2	12,4
2015	84,5	11,9
2016	70	12,6

Таблица 10. Динамика гидробиологических показателей (средняя концентрация хлорофилла « », средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период)

Год	Средняя концентрация хлорофилла « », мкг/л	Средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период, мг/л
1997	19,5	5,7
1998	24,1	8,2
1999	31,6	15,6
2000	29,5	12,3
2001	30,5	10,2
2002	50,9	21,4
2003	42	14,4
2004	28,9	11,9
2005	27,5	12,6
2006	40,2	21,8
2007	36,8	15,3

2008	38,9	10,3
2009	43,6	11,5
2010	26,6	9
2011	39,3	9,7
2012	46,1	7,7
2013	43	11,2
2014	39,3	11,4
2015	52,7	13,6
2016	48,6	11,5

Таблица 11. Усредненные за период 1997-2016 годы гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические показатели озера Теплое

Показатель	Среднее значение
Глубина видимости диска Секки, м	1,04
Фосфор валовый, мкг/л	75,6
Отношение концентрации азота валового к фосфору валовому	13,0
Концентрация хлорофилла « а », мкг/л	37,0
Биомасса фитопланктона за вегетационный период, мг/л	12,3

4.

По данным, приведенным в табл. 8-11, была проведена оценка динамики трофического статуса озера Теплое по гидрофизическому (глубина видимости диска Секки), гидрохимическим (среднее содержание фосфора валового, отношение концентраций азота валового к фосфору валовому) и гидробиологическим показателям (средняя концентрация хлорофилла « », средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период) (табл. 12-18 и рис. 9-13).

4.1.

Таблица 12. Динамика трофического статуса озера Теплое по гидрофизическому показателю (глубина видимости диска Секки)

Год	Глубина видимости диска Секки, м	Трофический статус
1997	1,33	Гипертрофный
1998	1,20	Гипертрофный
1999	1,60	Эвтрофный
2000	1,31	Гипертрофный
2001	1,09	Гипертрофный
2002	0,85	Гипертрофный
2003	0,91	Гипертрофный
2004	1,08	Гипертрофный
2005	1,04	Гипертрофный
2006	0,83	Гипертрофный
2007	0,93	Гипертрофный
2008	1,09	Гипертрофный
2009	0,95	Гипертрофный

2010	1,10	Гипертрофный
2011	0,94	Гипертрофный
2012	0,91	Гипертрофный
2013	0,91	Гипертрофный
2014	0,98	гипертрофный
2015	0,95	гипертрофный
2016	0,80	гипертрофный

Как следует из табл. 12, в 1999 г. трофический статус озера Теплое характеризовался как «эвтрофный», а в остальные годы – как «гипертрофный».

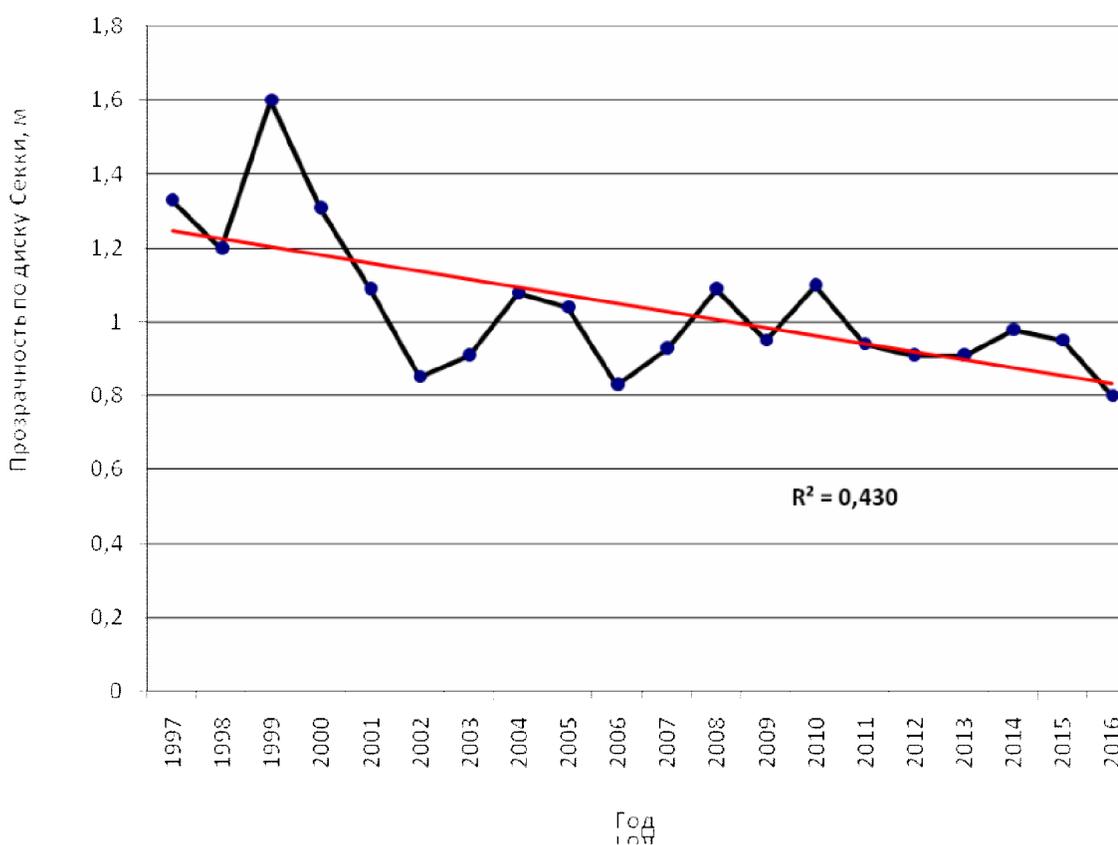


Рисунок 9. Динамика трофического статуса озера Теплое по гидрофизическому показателю (глубина видимости диска Секки)

Значению коэффициента детерминации $R^2 = 0,4309$, приведенному на рис. 9, соответствует коэффициент корреляции $R = 0,66$.

Согласно шкале Чеддока установленный тренд глубины видимости диска Секки за период с 1997 г. по 2016 г. характеризуется как «заметный отрицательный».

4.2.

Таблица 13. Динамика трофического статуса озера Теплое по гидрохимическому показателю (среднее содержание фосфора валового)

Год	Среднее содержание фосфора валового, мкг/л	Трофический статус
1997	76,7	Эвтрофный
1998	65,9	Эвтрофный
1999	79,4	Эвтрофный
2000	64,1	Эвтрофный
2001	79,4	Эвтрофный
2002	100,1	Гипертрофный
2003	102,5	Гипертрофный
2004	68,0	Эвтрофный
2005	70,1	Эвтрофный
2006	102,8	Гипертрофный
2007	65,6	Эвтрофный
2008	61,7	Эвтрофный
2009	72,5	Эвтрофный
2010	62,3	Эвтрофный
2011	72,2	Эвтрофный
2012	70,4	Эвтрофный

2013	74,9	Эвтрофный
2014	69,2	Эвтрофный
2015	84,5	Эвтрофный
2016	70,0	Эвтрофный

Как следует из табл. 13, в 2002 г., 2003 г. и в 2003 г. трофический статус озера Теплое характеризовался как «гипертрофный», а в остальные годы – как «эвтрофный».

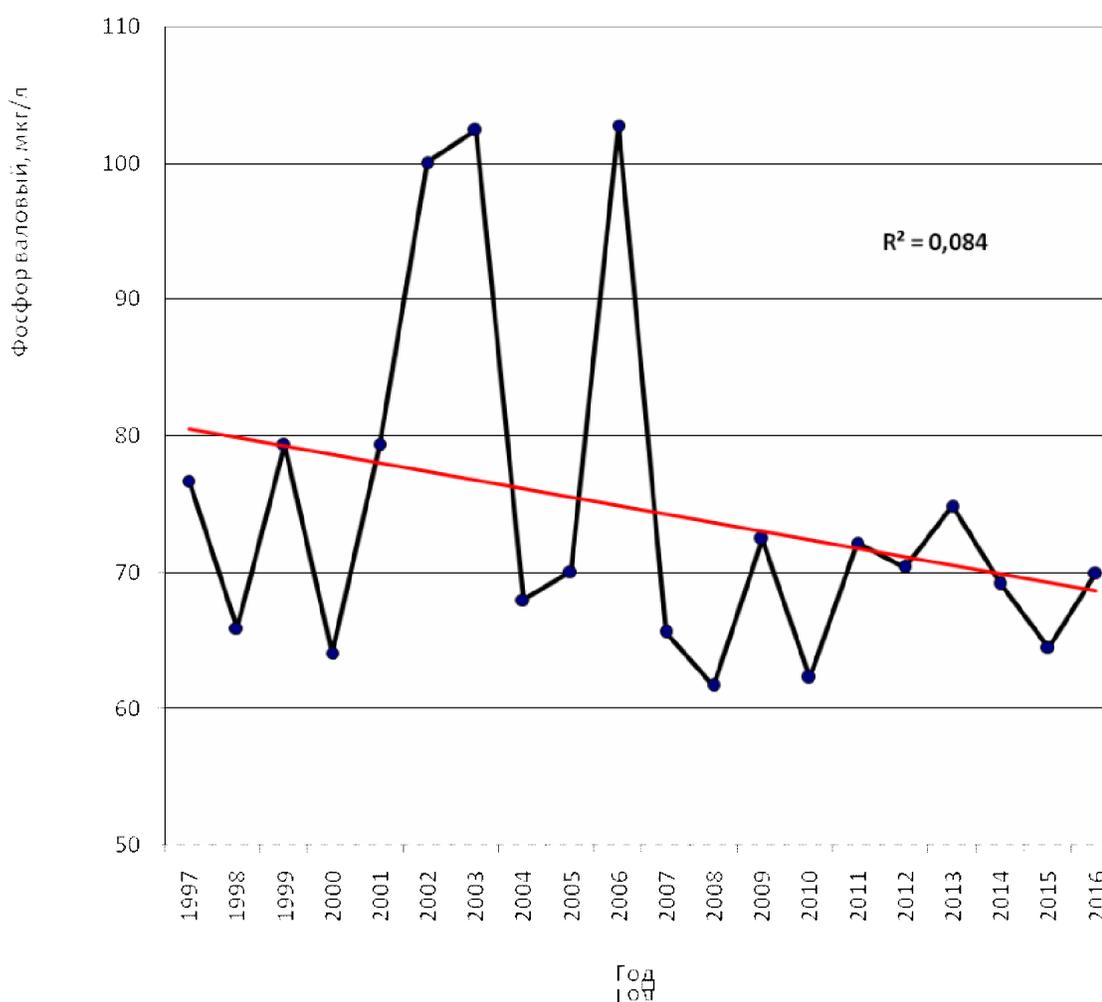


Рисунок 10. Динамика трофического статуса озера Теплое по гидрохимическому показателю (среднее содержание фосфора валового)

Значению коэффициента детерминации $R^2 = 0,0845$, приведенному на рис. 10, соответствует коэффициент корреляции $R = 0,29$.

Согласно шкале Чеддока установленный тренд по гидрохимическому показателю (среднее содержание фосфора валового) за период с 1997 г. по 2016 г. характеризуется как «слабый отрицательный».

Таблица 14. Динамика трофического статуса озера Теплое по гидрохимическому показателю (отношение концентраций азота валового к фосфору валовому)

Год	Отношение концентраций азота валового к фосфору валовому	Трофический статус
1997	17,7	Эвтрофный
1998	13,9	Гипертрофный
1999	10,9	Гипертрофный
2000	12,3	Гипертрофный
2001	11,0	Гипертрофный
2002	11,3	Гипертрофный
2003	9,3	Гипертрофный
2004	12,1	Гипертрофный
2005	11,8	Гипертрофный
2006	9,7	Гипертрофный
2007	19,2	Эвтрофный
2008	16,1	Эвтрофный
2009	12,0	Гипертрофный
2010	13,8	Гипертрофный
2011	14,3	Гипертрофный
2012	14,4	Гипертрофный
2013	13,0	Гипертрофный

2014	12,4	Гипертрофный
2015	11,9	Гипертрофный
2016	12,6	Гипертрофный

Как следует из табл. 14, в 1997 г., 2007 г. и в 2008 г. трофический статус озера Теплое характеризовался как «эвтрофный», а в остальные годы – как «гипертрофный».

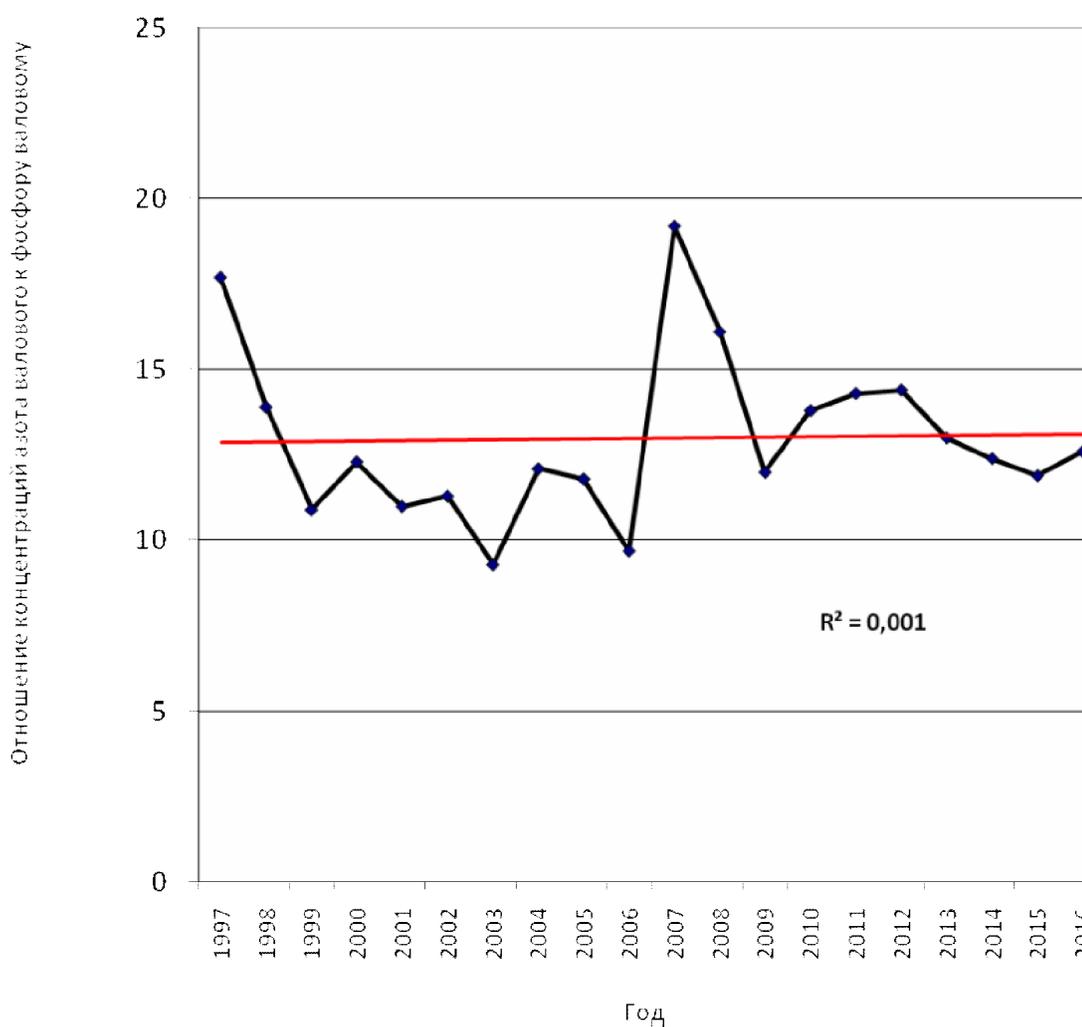


Рисунок 11. Динамика трофического статуса озера Теплое по гидрохимическому показателю (отношение концентраций азота валового к фосфору валовому)

Значению коэффициента детерминации $R^2 = 0,0011$, приведенному на рис. 11, соответствует коэффициент корреляции $R = 0,03$.

Согласно шкале Чеддока установленный тренд трофического статуса озера Теплое по гидрохимическому показателю (отношение концентраций азота валового к фосфору валовому) за период с 1997 г. по 2016 г. характеризуется как «слабый».

4.3.

Таблица 15. Динамика трофического статуса озера Теплое по гидробиологическому показателю (средняя концентрация хлорофилла « »)

Год	Средняя концентрация хлорофилла « », мкг/л	Трофический статус
1997	19,5	Эвтрофный
1998	24,1	Эвтрофный
1999	31,6	Гипертрофный
2000	29,5	Гипертрофный
2001	30,5	Гипертрофный
2002	50,9	Гипертрофный
2003	42,0	Гипертрофный
2004	28,9	Гипертрофный
2005	27,5	Гипертрофный
2006	40,2	Гипертрофный
2007	36,8	Гипертрофный
2008	38,9	Гипертрофный
2009	43,6	Гипертрофный
2010	26,6	Гипертрофный
2011	39,3	Гипертрофный

2012	46,1	Гипертрофный
2013	43,0	Гипертрофный
2014	39,3	Гипертрофный
2015	52,7	Гипертрофный
2016	48,6	Гипертрофный

Как следует из табл. 15, в 1997 г. и в 1998 г. трофический статус озера Теплое характеризовался как «эвтрофный», а в остальные годы – как «гипертрофный».

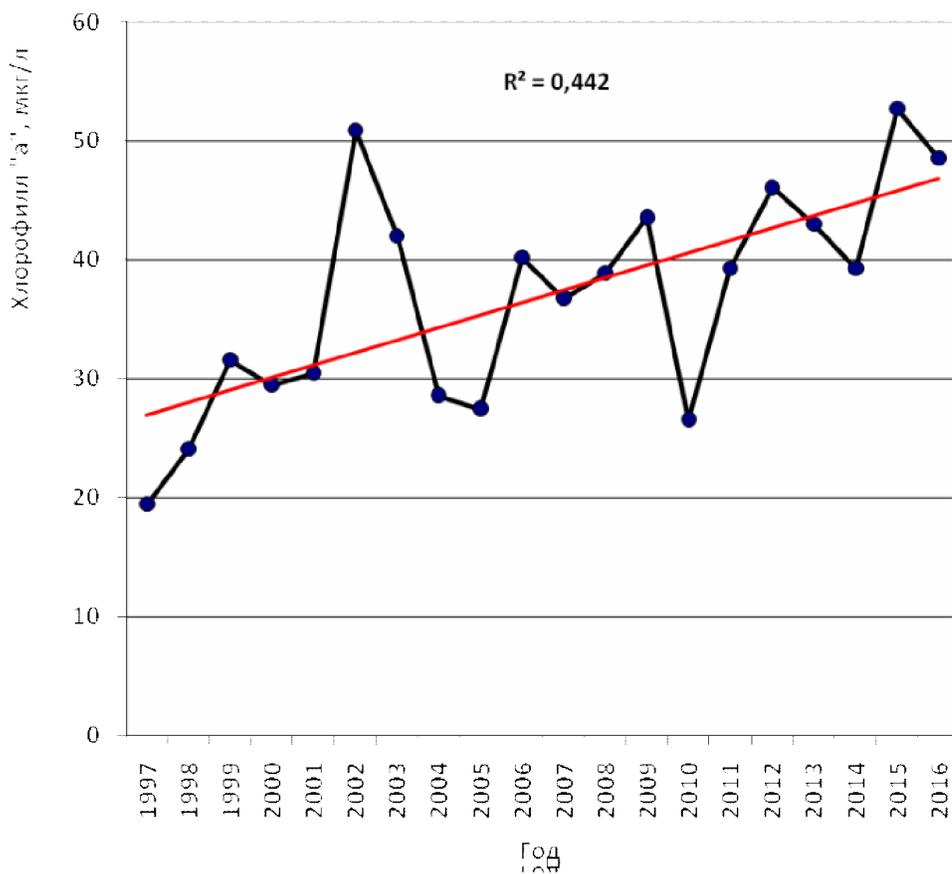


Рисунок 12. Динамика трофического статуса озера Теплое по гидробиологическому показателю (средняя концентрация хлорофилла « »)

Значению коэффициента детерминации $R^2 = 0,4421$, приведенному на рис. 12, соответствует коэффициент корреляции $R = 0,66$.

Согласно шкале Чеддока установленный тренд трофического статуса озера Теплое по гидробиологическому показателю (средняя концентрация хлорофилла « ») за период с 1997 г. по 2016 г. характеризуется как «положительный заметный».

Таблица 16. Динамика трофического статуса озера Теплое по гидробиологическому показателю (средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период)

Год	Средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период, мг/л	Трофический статус
1997	5,7	Эвтрофный
1998	8,2	Эвтрофный
1999	15,6	Гипертрофный
2000	12,3	Гипертрофный
2001	10,2	Гипертрофный
2002	21,4	Гипертрофный
2003	14,4	Гипертрофный
2004	11,9	Гипертрофный
2005	12,6	Гипертрофный
2006	21,8	Гипертрофный
2007	15,3	Гипертрофный
2008	10,3	Гипертрофный
2009	11,5	Гипертрофный
2010	9,0	Эвтрофный
2011	9,7	Эвтрофный
2012	7,7	Эвтрофный

2013	11,2	Гипертрофный
2014	11,4	Гипертрофный
2015	13,6	Гипертрофный
2016	11,5	Гипертрофный

Как следует из табл. 16, в 1997 г., 1998 г., 2010-2012 гг. трофический статус озера Теплое характеризовался как «эвтрофный», а в остальные годы – как «гипертрофный».

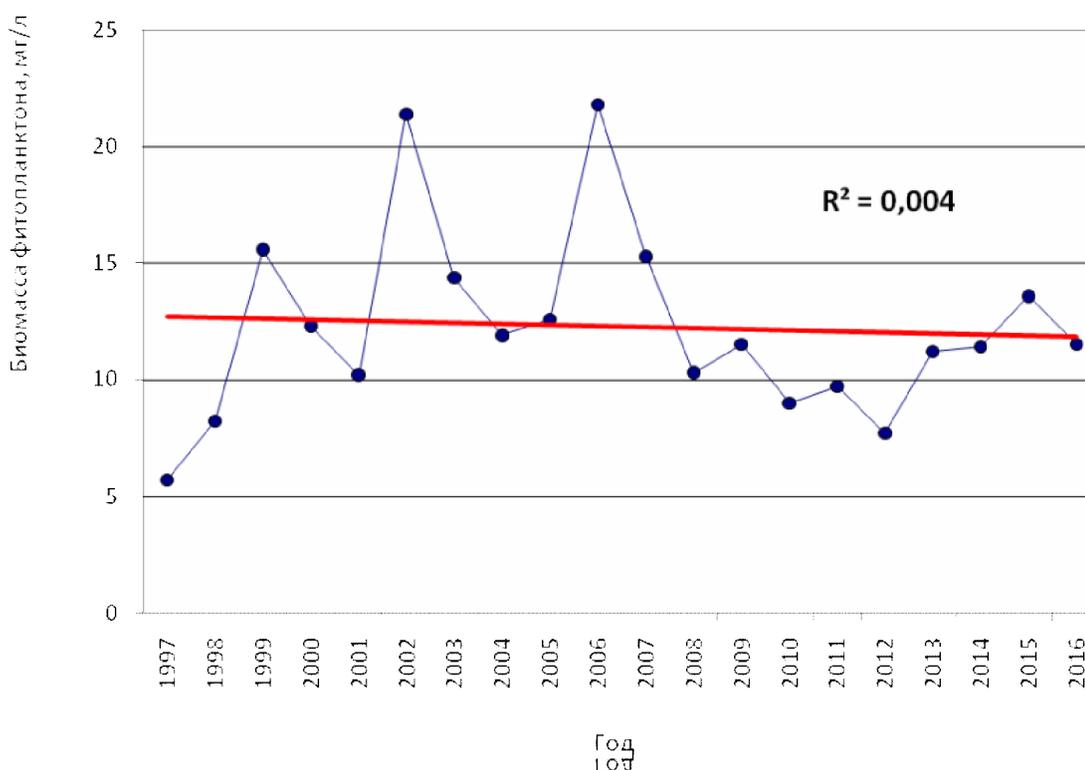


Рисунок 13. Динамика трофического статуса озера Теплое по гидробиологическому показателю (средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период)

Значению коэффициента детерминации $R^2 = 0,0046$, приведенному на рис. 13, соответствует коэффициент корреляции $R = 0,07$.

Согласно шкале Чеддока установленный тренд трофического статуса озера Теплое по гидробиологическому показателю (средняя биомасса

фитопланктона за вегетационный период) за период с 1997 г. по 2016 г. характеризуется как «отрицательный слабый».

В обобщенном виде результаты оценок трофического статуса озера Теплое приведены в табл. 17. При этом были использованы следующие сокращения: глубина видимости диска Секки (ПР), среднее содержание фосфора валового ($P_{\text{ВАЛ}}$), отношение концентраций азота валового к фосфору валовому ($N_{\text{ВАЛ}}:P_{\text{ВАЛ}}$), среднегодовая концентрация хлорофилла « » (Chl), средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период (ФП). Трофический статус: эвтрофный (Э), гипертрофный (ГТ).

Таблица 17. Трофический статус озера Теплое

Год	ПР	$P_{\text{ВАЛ}}$	$N_{\text{ВАЛ}}:P_{\text{ВАЛ}}$	Chl	ФП
1997	ГТ	Э	Э	Э	Э
1998	ГТ	Э	ГТ	Э	Э
1999	Э	Э	ГТ	ГТ	ГТ
2000	ГТ	Э	ГТ	ГТ	ГТ
2001	ГТ	Э	ГТ	ГТ	ГТ
2002	ГТ	ГТ	ГТ	ГТ	ГТ
2003	ГТ	ГТ	ГТ	ГТ	ГТ
2004	ГТ	Э	ГТ	ГТ	ГТ
2005	ГТ	Э	ГТ	ГТ	ГТ
2006	ГТ	ГТ	ГТ	ГТ	ГТ
2007	ГТ	Э	Э	ГТ	ГТ
2008	ГТ	Э	Э	ГТ	ГТ
2009	ГТ	Э	ГТ	ГТ	ГТ
2010	ГТ	Э	ГТ	ГТ	Э
2011	ГТ	Э	ГТ	ГТ	Э
2012	ГТ	Э	ГТ	ГТ	Э
2013	ГТ	Э	ГТ	ГТ	ГТ

2014	ГТ	Э	ГТ	ГТ	ГТ
2015	ГТ	Э	ГТ	ГТ	ГТ
2016	ГТ	Э	ГТ	ГТ	ГТ

Анализ данных, приведенных в табл. 17, показывает, что оценка трофического статуса зависит от примененной для этой цели методики. Так, например, при использовании в качестве показателя трофического статуса глубины видимости диска Секки в одном из 20 случаев за период 1997-2016 гг. трофический статус озера Теплое характеризуется как «эвтрофный». При использовании в качестве показателя трофического статуса содержания фосфора валового в 17 из 20 случаев за период 1997-2016 гг. трофический статус озера Теплое характеризуется как «эвтрофный», а в 3 случаях - как «гипертрофный». При использовании в качестве показателя трофического статуса среднегодовой концентрации хлорофилла « » в двух из 20 случаев трофический статус озера Теплое характеризуется как «эвтрофный», а в остальных случаях – как «гипертрофный». При использовании в качестве показателя трофического статуса средней биомассы фитопланктона за вегетационный период в пяти из двадцати случаев трофический статус озера Теплое характеризуется как «эвтрофный», а в остальных случаях – как «гипертрофный».

В связи с изложенным были рассчитаны значения средних показателей за период 1997-2016 гг. Используя эти данные, были определены характеристики трофического статуса озера Теплое (табл. 18).

Таблица 18. Трофический статус озера Теплое

Показатель	Среднее значение	Трофический статус
Глубина видимости диска Секки, м	1,04	Гипертрофный
Фосфор валовый, мкг/л	75,6	Эвтрофный
Отношение концентрации азота валового к фосфору валовому	13,0	Гипертрофный
Концентрация хлорофилла « а », мкг/л	37,0	Гипертрофный
Биомасса фитопланктона за вегетационный период, мг/л	12,3	Гипертрофный

4.4.

Исследование зависимости трофического уровня водоема от количества поступающего в него фосфора привело к развитию так называемой нагрузочной концепции, в основу которой положено представление о существовании количественной связи между величиной поступления фосфора и реакцией водоема. Результатом этого, как правило, является изменение положения водоема на трофической шкале. Фолленвайдером [45] предложено первое приближение величины фосфорной нагрузки ($L_{кр}$, гР/м²·год), позволяющей водоему оставаться в олиготрофном состоянии, в расчете которой в качестве стандартного параметра используется только средняя глубина водоема ($ср$, м):

$$L_{кр} = 0,025 \cdot ср^{0,6}$$

Для озера Теплое $ср = 2,5$ м, площадь озера 236 км². В этом случае $L_{кр} = 10$ тонн/год.

Иными словами, для того, чтобы трофический статус озера Теплое характеризовался как «олиготрофный» критическая фосфорная нагрузка не должна превышать 10 тонн фосфора в год.

В связи с изложенным представлялось интересным сопоставить фактическое содержание фосфора валового с критической фосфорной нагрузкой (рис. 14).

Как следует из данных, приведенных на рис. 14, за весь период наблюдений с 1997 г. по 2016 г. содержание фосфора валового в озере Теплое существенно превышало критическую фосфорную нагрузку (10 тонн/год).

Изложенное приводит к выводу о необходимости существенного снижения антропогенной нагрузки на озеро Теплое, что может быть реализовано путем существенного снижения антропогенной нагрузки на Псковское озеро.

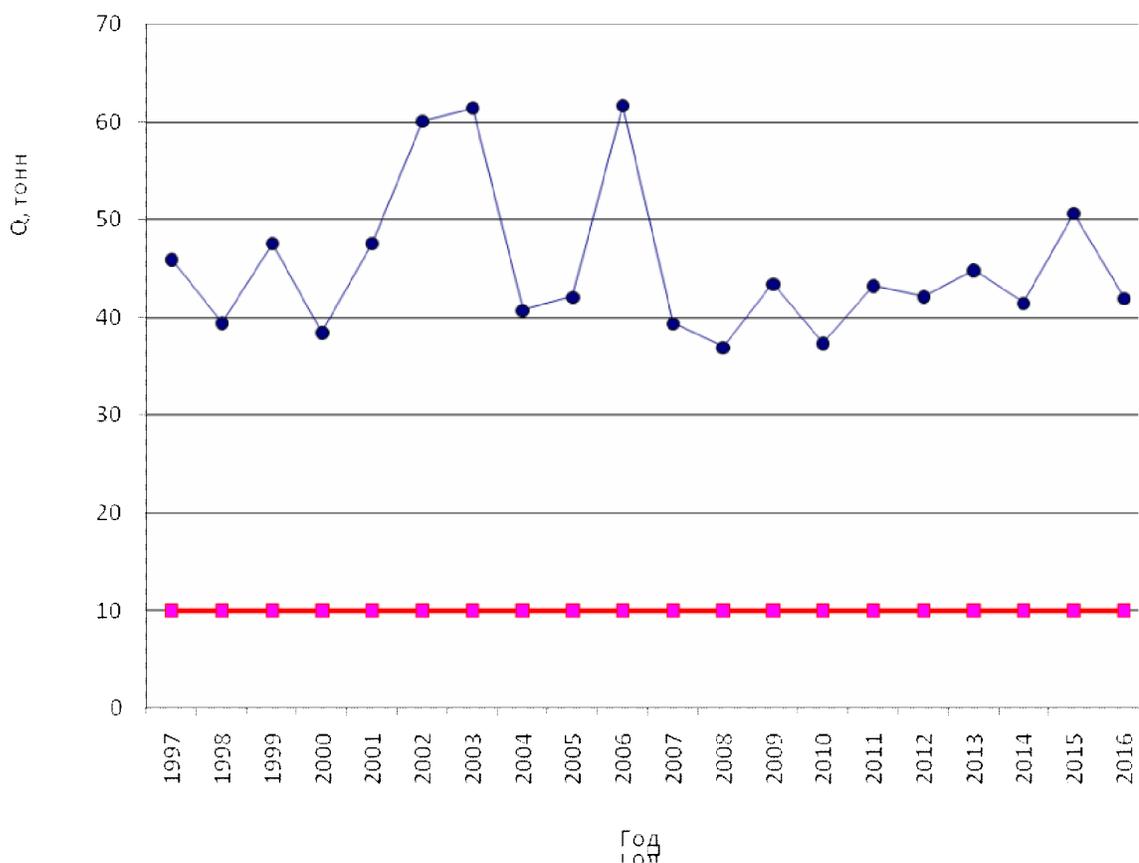


Рисунок 14. Сопоставление фактического содержания фосфора валового в озере Теплое (Q) с критической фосфорной нагрузкой (10 тонн/год)

1. Для эмпирического описания трофического статуса могут быть использованы один или более гидрофизических, гидрохимических или гидробиологических индикаторов.
2. За период с 1997 года по 2016 год трофический статус озера Теплое характеризовался как «эвтрофный» или «гипертрофный» в зависимости от использованного критерия (показателя).
3. По среднему значению концентрации фосфора валового за период 1997 - 2016 гг. трофический статус озера Теплое характеризуется как «эвтрофное», а по остальным показателям – как «гипертрофное».
4. Критическая фосфорная нагрузка на озеро Теплое, позволяющая характеризовать его трофический статус как «олиготрофный», не должна превышать 10 тонн фосфора/год. За весь период наблюдений с 1997 г. по 2016 г. содержание фосфора валового в озере Теплое существенно превышало критическую фосфорную нагрузку.
5. Необходимо существенно снизить фосфорную антропогенную нагрузку на озеро Теплое, что может быть реализовано путем существенного снижения антропогенной нагрузки на Псковское озеро.

Проведен анализ динамики трофического статуса озера Теплое, расположенного между Псковским и Чудским озерами, за период с 1997 года по 2016 год. Для анализа использованы гидрофизический (глубина видимости диска Секки), два гидрохимических (среднее содержание фосфора валового, отношение концентраций азота валового к фосфору валовому) и два гидробиологических (среднегодовая концентрация хлорофилла « », средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период) критериев. Установлено, что трофический статус озера Теплое характеризуется как «эвтрофный» или «гипертрофный» в зависимости от выбранного критерия (показателя).

По модели Фолленвайдера проведен расчет критической фосфорной нагрузки на озеро Теплое. Установлено, что критическая фосфорная нагрузка на это озеро, позволяющая характеризовать его трофический статус как «олиготрофный», не должна превышать 10 тонн фосфора /год.

За весь период наблюдений с 1997 г. по 2016 г. содержание фосфора валового в озере Теплое существенно превышало критическую фосфорную нагрузку (10 тонн/год).

Изложенное приводит к выводу о необходимости существенного снижения фосфорной антропогенной нагрузки на озеро Теплое, что может быть реализовано путем существенного снижения антропогенной нагрузки на Псковское озеро.