
**PHYTOPLANKTON,
PHYTOBENTHOS, AND PHYTOPERIPHYTON**

Comprehensive Assessment of River-Water Quality in Primorskii krai, Russian Federation, with Respect to Chemical Characteristics and Composition of Periphyton Algae

V. M. Shulkin^a and T. V. Nikulina^b

^a*Pacific Geographical Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Radio 7, Vladivostok, 690041 Russia
e-mail: shulkin@tig.dvo.ru*

^b*Soil Biology Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
pr. Stoletiya Vladivostoka 159, Vladivostok, 690022 Russia*

Received April 3, 2013

Abstract—Data on the water chemical composition and species composition of periphyton algae have been analyzed in 25 rivers under different rates of anthropogenic impact in Primorskii krai, Russia. It is shown that chemical oxygen demand and the content of ammonium compounds of dissolved nitrogen are the most definite indicators of total anthropogenic impact. In the Razdol'naya River, which as the greatest anthropogenic eutrophication, it may be also indicated by organic compounds of dissolved phosphorus and nitrates. The number and biomass of periphyton algae varies considerably even within similar water streams. The alga species composition and the saprobity index calculated on its basis are more stable. The saprobity index is characterized by less spatial variability when compared to the chemical composition of river water. Nevertheless, there is a correlation between the saprobity index and the content of ammonium nitrogen, as well as between the saprobity index trend within the last 20 years and input of contaminants into the Razdol'naya River.

Keywords: water chemical composition, biogenic substances, water quality, periphyton algae, saprobity index, rivers of Primorskii krai

DOI: 10.1134/S1995082915010149

INTRODUCTION

A quality assessment of fresh water with respect to chemical and biological characteristics was introduced into the monitoring system of the National Committee of Hydrometeorology in 1972 [9, 10]. Characteristics of plankton, periphyton, zoobenthos, and fish are used as biological indicators of freshwater status [10]. Methods of studying the reaction of periphyton and plankton algae on the contamination of water reservoirs and streams are best elaborated. Periphyton algae are used to assess saprobity (the rate of organic contamination of water reservoirs) for a 100-year-long period or more [22]. In countries of the European Community and the United States of America, more than 20 indexes are elaborated to assess the water contamination rate using algae (diatoms in particular) as bioindicators [18, 23, 28]. Nevertheless, a great variety of biological indicators restricts a comparison of the obtained data. The relationship between hydrobiological characteristics and the chemical composition of waters is also very important, but there are no sufficient issues devoted to a comprehensive analysis of the status of water ecosystems [16, 21]. The correlation between chemical and hydrobiological characteristics or a lack of it may con-

siderably increase the reliability and ecological justification of water-quality assessment and help determine the most adequate combination of indicators of water-object status.

The aim of this issue is (i) to comprehensively analyze the chemical composition of waters and status of periphyton algae in the rivers of the Primorskii krai characterized by various rates of anthropogenic impact in order to reveal the most informative indicators of river-water quality and (ii) assess tendencies of changes in the status of the Razdol'naya River that have undergone the greatest anthropogenic impact in the last 20-year-long period using the revealed indicators.

OBJECTS AND METHODS

Periphyton and water samples were taken at 43 stations on 25 rivers of Primorskii krai in 2009–2011. Large rivers (Bikin, Bol'shaya Ussurka (B. Ussurka), and Razdol'naya) and small water streams allocated to regions with different development rates were examined (Table 1). The population density of administrative areas allocated to the drainage basins was used as a measure of anthropogenic impact [13]. Three natural-economic regions (southwestern, southeastern, and

Table 1. Brief description of water streams in the Primorskii krai

Region	River	Basin area, km ²	Annual average water discharge*, m ³ /s	Population density**, individuals/km ²		
Southwestern	Tsukanovka	170	3.9	4.3		
	Ryazanovka	148	2.7			
	Poima	85	1.7			
	Kedrovaya	56	0.8			
	Amba	242	6.1			
	Nezhinka	76	0.91			
	Borisovka	1560	7.8			
Southeastern	Artemovka	894	6.3	8.5		
	Shkotovka	706	5.7			
	Litovka	107	1.07			
	Novorudnaya	25	0.25			
	Ekaterinovka	44	0.44			
	Pad' Shirokaya	9.6	0.10			
	Manankina	22	0.18			
	Simonova	1.9	0.02			
	Western (slope of the Sikhote-Alin' Ridge)	Snegurovka	473		2.4	13.1
		Vassianovka	233		1.2	
Chernigovka		121	0.61			
Medveditsa		42	0.34			
Sorochevka		114	0.57			
Zolotoi		46	0.37			
Kabarga		763	7.6			
Basin of the rivers						
Razdol'naya	Razdol'naya	16800	71.9	29.9		
Bol'shaya Ussurka	B. Ussurka	29500	351	2.2		
Bikin	Bikin	21400	238	1.4		

* Calculated according to [4].

** Data of 2010 according to [13].

western) and drainage areas of the Razdol'naya, B. Ussurka, and Bikin rivers were distinguished in the studied area. The Razdol'naya River, in which the species composition of algae was comprehensively studied in 1989–1997 [5], was investigated in May and August 2009. Samples were taken in the lower reaches at stations 4–6 allocated to the river part between the Russia–China boundary and the river mouth (Fig. 1).

At sampling places, water was filtered through a GWV Pall™ capsule filter with pores of 0.45 μm, and pH and electrical conductivity were measured. Filtrates were preserved by adding chloroform and analyzed at a laboratory by conventional spectrophotometric and chromatographic approaches for determining nitrate and ammonium nitrogen, mineral and organic compounds of dissolved phosphorus, dissolved silicon, and the content of macroions [8].

Chemical oxygen demand (COD) was determined in unfiltered water.

Algae were sampled by conventional methods [2, 12] and studied in a laboratory under an Axioskop 40 light microscopes (Zeiss, object-glasses ×40/0.65 and ×100/1.25 oil) and Alphaphot-2YS2 light microscopes (Nikon, object-glasses ×40/0.65 and ×100/1.25 oil). The species composition of sampled algae was determined with the use of modern systematic lists. Alga biomass was determined by the volumetric–counting approach [2]. Upon characterizing the structure of alga cenoses, associations of predominating species were revealed, and their occurrence was determined by a six-point scale [3]. We assigned taxa with occurrence 6 (mass) to dominants and those with occurrence 5 (very frequent) to subdominants. If species of high occurrence were absent, taxa with highest occurrence were

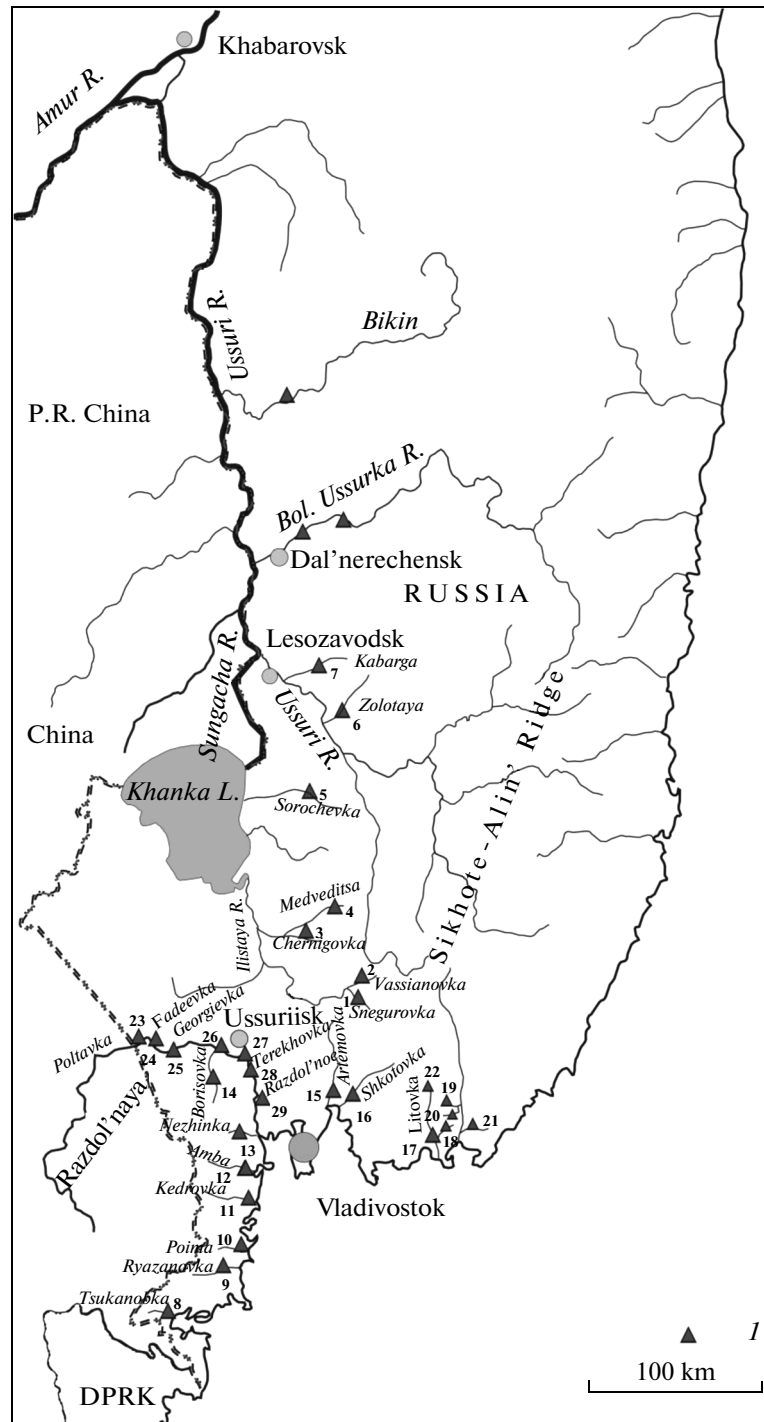


Fig. 1. Schematic map of investigated region: (1) points of water and periphyton sampling; (1) Snegurovka, (2) Vassianovka, (3) Chernigovka, (4) Medveditsa, (5) Sorochevka, (6) Zolotaya, (7) Kabarga, (8) Tsukanovka, (9) Ryazanovka, (10) Poima, (11) Kedrovaya, (12) Amba, (13) Nezhinka, (14) Borisovka, (15) Artemovka, (16) Shkotovka, (17) Litovka, (18) Novorudnaya, (19) Ekaterinovka, (20) Pad' Shirokaya, (21) Manankina, (22) Simonov, (23) Poltavka, (24) Fadeevka, (25) Georgievka, (26) Borisovka, (27) Ussuriisk, (28) Terekhovka, and (29) Razdol'noe.

assigned to predominating ones. Species diversity of algae was assessed by a Shannon–Weaver index [29] calculated by the total alga number (H) and number of diatoms (H_{Bac}). Saprobity indexes (S) were deter-

mined by an approach elaborated by Pantle and Buck [27] and modified by Sladechek [11, 30] with respect to the composition of indicators of organic contamination. The alga species was assigned to the saprobio-

Table 2. Hydrochemical and saprobiotic characteristics of river water in the investigated regions of Primorskii krai (mean values with standard deviation)

Characteristic	Region			River		MPC (according to [9])
	Southeastern	Southwestern	Western	Razdol'naya	B. Ussurka	
Number of samples	10	7	12	11	3	
Electrical conductivity, mS/cm	58 ± 18	56 ± 19	67 ± 26	101 ± 20	44 ± 2	–
Mineralization, mg/L	57 ± 19	57 ± 22	72 ± 28	91 ± 17	52 ± 3	1000
NH ₄ ⁻ , mg N/L	0.04 ± 0.03	0.02 ± 0.02	0.08 ± 0.08	0.09 ± 0.07	0.07 ± 0.02	0.4
NO ₃ ⁻ , mg N/L	0.32 ± 0.24	0.05 ± 0.08	0.12 ± 0.19	0.33 ± 0.24	0.17 ± 0.06	9.1
P _{min} , µg/L	12 ± 7	6 ± 3	7 ± 5	13 ± 11	7 ± 5	50
P _g , µg/L	11 ± 4	7 ± 3	11 ± 3	21 ± 5	12 ± 10	–
Si, mg/L	5.4 ± 1.5	7.3 ± 2.6	6.2 ± 2.3	4.1 ± 2.6	5.3 ± 0.3	–
COD, mg O/L	8.8 ± 2.9	4.3 ± 3.2	17.5 ± 10.8	19.5 ± 8.7	13.2 ± 2.0	15
Saprobity Index	1.41 ± 0.15	1.42 ± 0.08	1.52 ± 0.18	1.58 ± 0.09	1.45 ± 0.16	–

Values of characteristics significantly different with respect to a Mann–Whitney test are given in bold type.

logical group and its indicative role was determined on the basis of published data [1, 12, 20, 25, 31, 32].

Statistical treatment was performed with the use of a MiniTab 14 program pack, and the significance of mean difference was determined by a nonparametric Mann–Whitney test for small sampling.

RESULTS

Waters of rivers in Primorskii krai are usually assigned to ultrafresh ones (mineralization is less than 100 mg/L) with hydrocarbonate–calcium or hydrocarbonate–calcium–sodium composition (Table 2). In the specified regions, river-water mineralization and the electrical conductivity directly related to it vary 2–3 times and do not exceed 100 mg/L and 100 µS/cm, respectively (Fig. 2a). Exceptions are represented by the Medveditsa and the Vassianovka Rivers with mineralization of 115 and 137 mg/L. They are allocated to the western macroslope of the Sikhote-Alin' Ridge and drain developed lands. In the Razdol'naya River, water mineralization and the content of all macroions is considerably higher when compared to most of the studied rivers (Table 2). The content of macroions, cations in particular, correlates well with the mineralization of all the studied water streams (Figs. 2b–2d).

The content of biogenic substances in the studied rivers is more variable when compared to the content of water mineralization or the content of macroions (Fig. 3). The sole exception is represented by dissolved silicon: its variation coefficient for the entire sampling is 41%, which is comparable to the variability of mineralization and macroions (Table 2). Variation coefficients of the content of dissolved N and P compounds

in rivers of Primorskii krai are higher than 100%. It has been revealed that the mean content of ammonium nitrogen is lowest in rivers of the southwestern and the southeastern regions, medium in water streams of the western macroslope of the Sikhote-Alin' Ridge, and highest in the Razdol'naya River. Rivers of the southeastern and the southwestern regions are also characterized by low COD, while in the Razdol'naya River and one-half of the rivers of the western macroslope, COD is considerably higher (Table 2).

Direct correlations between COD and the content of dissolved organic phosphorus and between ammonium and nitrate nitrogen are only revealed in the Razdol'naya River (Figs. 3a, 3b). A correlation between COD and ammonium nitrogen is also seen in rivers of the western and the southeastern regions of Primorskii krai (Fig. 3c).

We have revealed 163 species (170 taxa with consideration of species, varieties, and forms) of algae assigned to six divisions: *Cyanoprokaryota*, *Chrysophyta*, *Xanthophyta*, *Bacillariophyta*, *Rhodophyta*, and *Chlorophyta*. Diatoms and green algae are the most diverse and comprise 82 and 12% of the general list of alga species. The greatest number of species, varieties, and forms is assigned to genera *Gomphonema* (15), *Nitzschia* (13), *Navicula* (10), and *Eunotia* (9).

A high occurrence is revealed for 31 species of blue-green, diatomic, and green algae (Table 3). They are mainly indifferent to salinity, alkaliphilic, benthic or widely spread, and oligo- or β-mesosaprobic. Compositions of predominating diatomic complexes of periphyton in water streams within each of the three natural-economic regions are similar, and the mass development of blue-green algae (*Homoeothrix varians*) is seen in all of them. Periphyton communities are

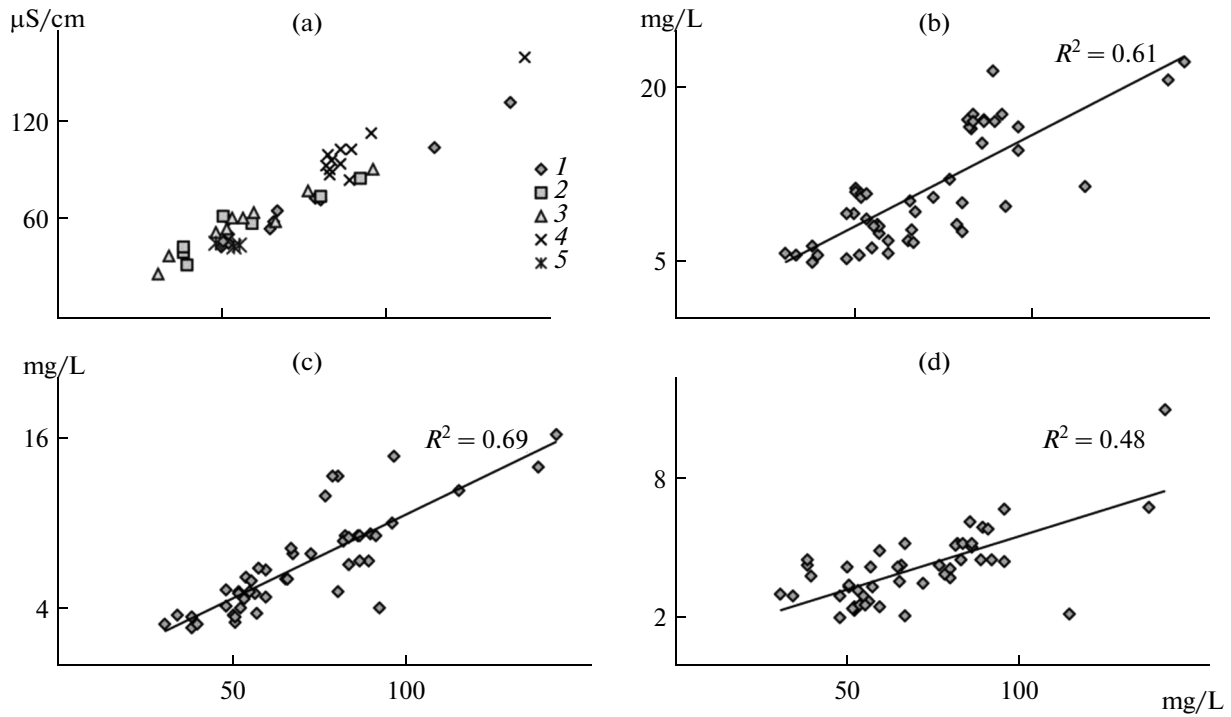


Fig. 2. Correlation between (a) mineralization (x axis) and electrical conductivity of rivers in (1) the western, (2) southwestern, and (3) southeastern regions of Primorskii krai and (4) the Razdol'naya and (5) Bikin and Bol'shaya Ussurka rivers and the content of (b) SO_4 , (c) Ca, and (d) Na macroions and mineralization.

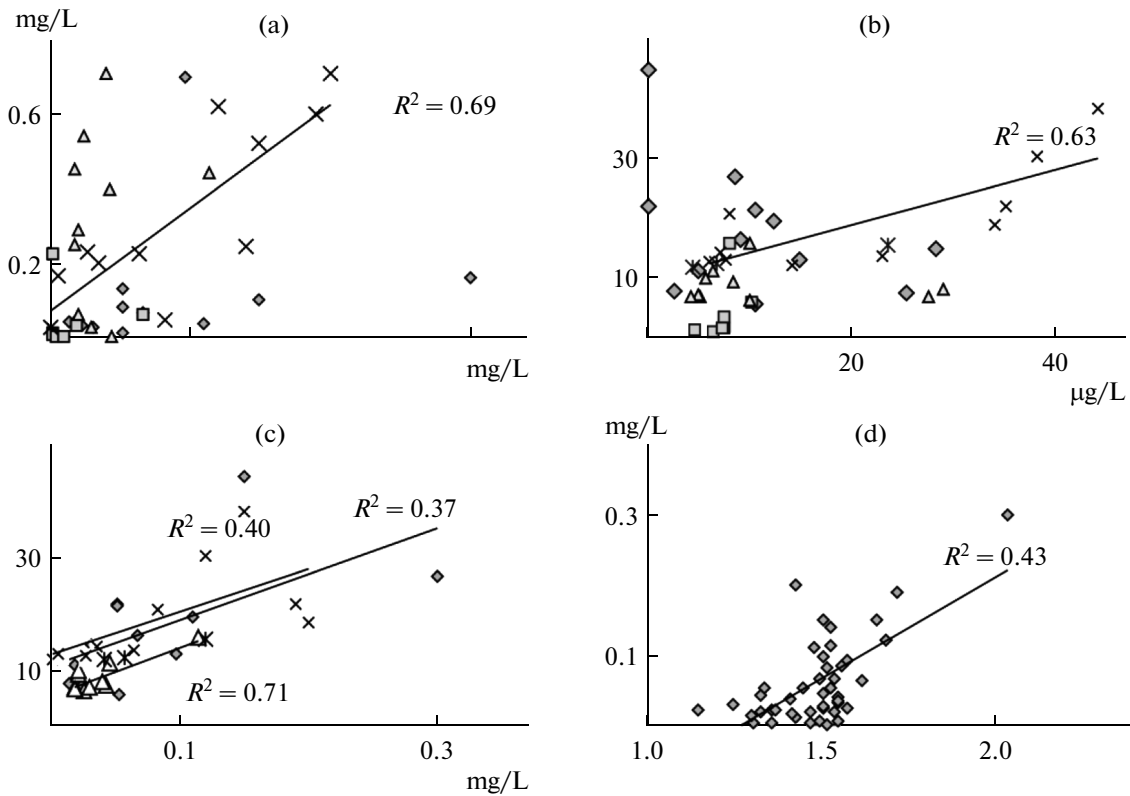


Fig. 3. Correlation between (a) ammonium (x axis) and nitrate (y axis) nitrogen compounds; (b) COD (y axis) and organic phosphorus compounds (x axis); (c) COD (y axis) and ammonium nitrogen compounds (x axis) in different rivers of Primorskii krai, and (d) ammonium nitrogen content (y axis) and saprobity index (x axis). The rest of the designations are given in the explication to Fig. 2.

Table 3. Predominating species of periphyton algae in rivers of the Primorskii krai and their ecological–geographical and saprobic–biological characteristic

Species	Saprobity	Saprobity Index	Habitat	Salinization tolerance	pH	Distribution
Cyanoprokaryota						
<i>Calothrix braunii</i> Bornet et Flahault	o	1.0	B	–	–	a–a
<i>Chamaesiphon confervicola</i> A. Braun	χ – β	0.9	B	–	–	k
<i>Homoeothrix varians</i> Geitler	o	1.0	B	–	–	–
<i>Phormidium autumnale</i> (Agardh) Gomont	β	2.1	B	–	–	k
<i>Tolypothrix distorta</i> Kützing ex Bornet et Flahault	o	1.2	B	–	–	k
<i>T. tenuis</i> Kützing	χ – β	0.8	B	i	–	k
Bacillariophyta						
<i>Achnantheidium minutissimum</i> (Kützing) Czarnecki	b	2.2	B	i	i	k
<i>Asterionella formosa</i> Hassall	o	1.0	P	i	alf	k
<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg var. <i>euglypta</i> (Ehrenberg) Grunow	b	–	B	i	alf	k
<i>Cymbella affinis</i> Kützing	β –o	1.7	B	i	alf	k
<i>C. tumida</i> (Brébisson) Van Heurck	x	0.2	B	i	alf	b
<i>C. turgidula</i> Grunow	–	–	B	–	i	k
<i>Encyonema caespitosum</i> Kützing	β – α	–	B	i	–	k
<i>E. silesiacum</i> (Bleisch) Mann	χ –o	0.5	B	i	i	k
<i>Fragilaria capucina</i> Desmazières	o– β	1.5	B–P	i	alf	k
<i>Gomphoneis olivaceum</i> (Hornemann) Dawson ex Ross et Sims	β	2.0	B	i	alf	k
<i>Gomphonema angustatum</i> (Kützing) Rabenhorst	b	2.0	B	i	alf	k
<i>Hannaea arcus</i> (Ehrenberg) Patrick	x	0.3	B	i	alf	a–a
<i>Melosira varians</i> Agardh	α – β	2.7	B–P	i	alf	k
<i>Meridion circulare</i> (Greville) Agardh	o– χ	0.8	B	hb	alf	k
<i>Navicula avenaceae</i> (Brébisson et Godey) Brébisson	o– β	1.4	B	i	alf	k
<i>N. cryptocephala</i> Kützing	x	0.2	B–P	i	alf	k
<i>N. radiosa</i> Kützing	o	1.5	B	i	i	k
<i>Nitzschia brevissima</i> Grunow	β	–	B	i	i	–
<i>N. dissipata</i> (Kützing) Grunow	χ	0.2	B	i	alf	b
<i>N. palea</i> (Kützing) W. Smith	α – β	2.75	B	i	i	k
<i>N. paleacea</i> (Grunow) Grunow	β	2.2	B–P	i	alf	k
<i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compère	o– α	1.9	B	i	alf	k
<i>U. inaequalis</i> (H. Kobayasi) M. Idei	–	–	B	–	–	–
Chlorophyta						
<i>Draparnaldia plumosa</i> (Vaucher) Agardh	β –o	1.6	B	–	–	–
<i>Microspora stagnorum</i> (Kützing) Lagerheim	β –o	1.6	P	–	–	–

(χ) xenosaprobe, (χ –o) xeno-oligosaprobe, (o– χ) oligo-xenosaprobe, (χ – β) xeno-betamesosaprobe, (o) oligosaprobe, (o– β) oligo-betamesosaprobe, (β –o) beta-oligomesosaprobe, (o– α) oligo-alphamesosaprobe, (β) betamesosaprobe, (β – α) beta-alphamesosaprobe, and (α – β) alpha-betamesosaprobe. Habitat: (P) planktonic, (B–P) benthic–planktonic, and (B) benthic. Salinization tolerance: (hb) halophobe and (i) indifferent. Acidity tolerance: (alf) alkaphile and (i) indifferent. Distribution: (a) arctic-alpine, (b) boreal, and (k) cosmopolite.

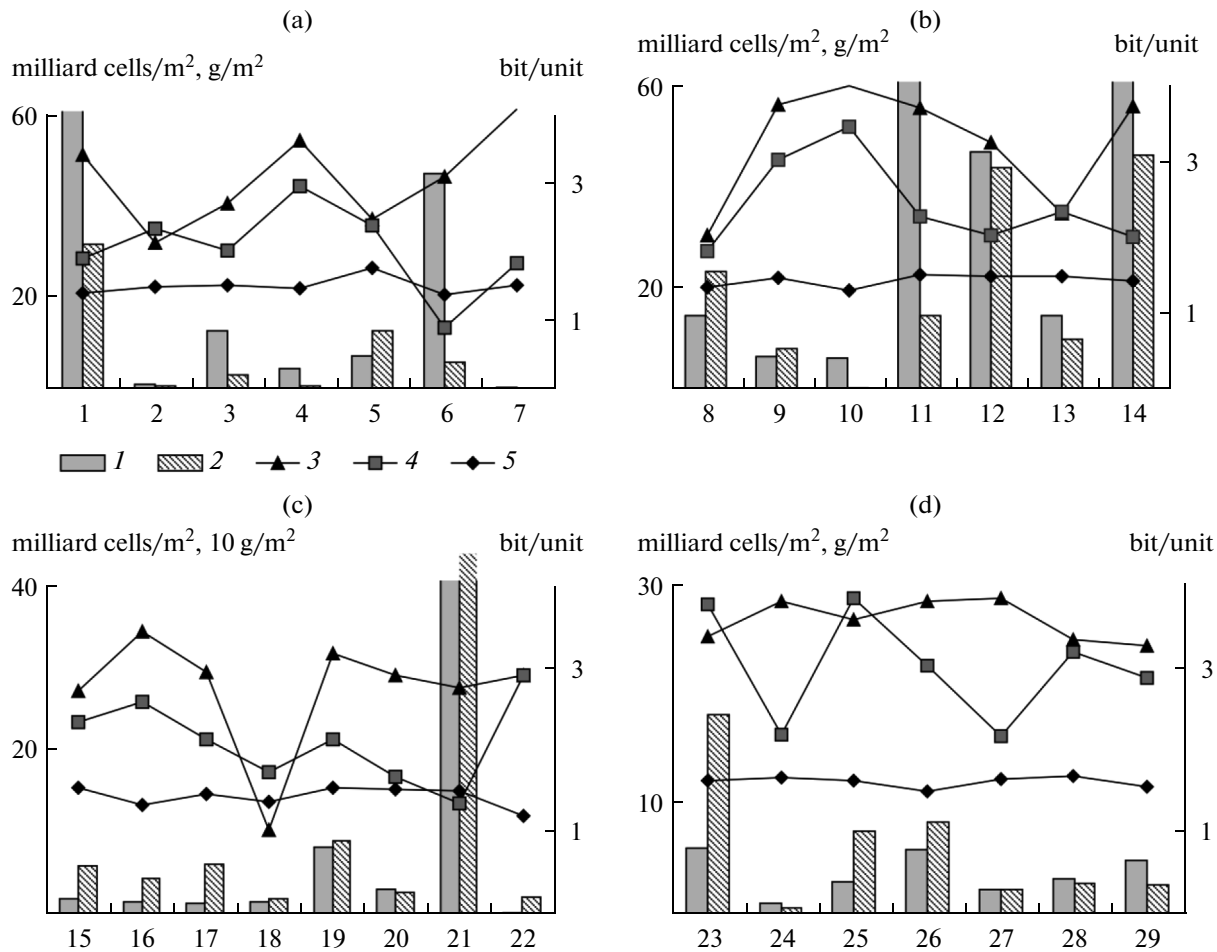


Fig. 4. Dependence of (1) number (milliard cells/m²) and (2) biomass (g/m²) of periphyton algae on indexes (bit/unit) of (3) saprobity, (5) Shannon–Weaver for diatomic communities, (4) Shannon–Weaver for alga communities with consideration of all the divisions in rivers of (a) western slope of the Sikhote-Alin’ Ridge, (b) the southwestern region, (c) the southeastern regions of Primorskii krai, and (d) the Razdol’naya River in 2009–2011. Numbers on x axis correspond to those in Fig. 1.

often predominated by *Gomphoneis olivaceum* and *Achnantheidium minutissimum* in rivers of the western slope of the Sikhote-Alin’ Ridge, by *Nitzschia paleacea* and *Cymbella affinis* in streams of the southwestern part of the Primorskii krai, and by *Gomphoneis olivaceum* and *Encyonema silesiaca* in rivers of its southeastern part.

Both monodominant and polydominant alga communities are formed in water streams of Primorskii krai. This is confirmed by wide and overlapped ranges of indexes of species diversity. In rivers of the studied area, *H* is equal to 0.80–3.79 in the southwestern region, 0.89–3.23 in the southeastern region, and 0.80–3.20 in the western region; *H*_{Bac} varies within 2.05–4.02, 1.02–2.45, and 1.57–4.11, respectively. For different parts of the Razdol’naya River, *H* varies from 1.05 to 3.92 and the range *H*_{Bac} is 3.36–4.18 (Fig. 4).

Algacenososes are predominated by blue-green algae with respect to number and by diatoms with respect to

biomass. The total number and biomass vary considerably in rivers of different regions (Fig. 4). The lowest data (0.16–8.3 milliard cells/m² and 0.2–0.6 g/m²) are obtained for small mountain water streams of the southeastern region. The sole exception is represented by the Manankina River, a small plain stream, draining a cultivated area (Fig. 4c). In the Razdol’naya River, alga number and biomass vary within 0.15–8.0 milliard cells/m² and 0.02–18.2 g/m², respectively (Fig. 4d).

Water saprobity may be indicated by 109 alga species and varieties (75% of total taxa number). Oligo- and β-mesosaprobies are the most numerous (30% and 27%, respectively). Saprobity indexes vary from 1.15 to 2.04 (Fig. 3d).

We have compared data on the species composition of periphyton algae in the part of the Razdol’naya River from the Russia–China boundary to the river mouth. The data were obtained in 1989 [5] and 2009 (Fig. 5a). The comparison shows that the value and

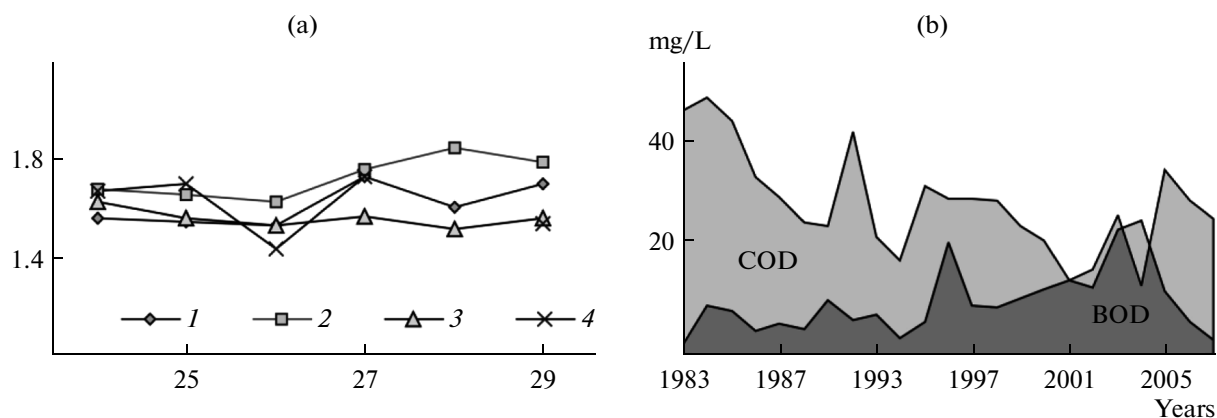


Fig. 5. Variations (a) in saprobity index of waters in the part of the Razdol'naya River from the Russia–China boundary to Ussuriisk (station 27) and to the Razdol'noe settlement (station 29) in 1989 (1, 2) and 2009 (3, 4) and (b) mean year COD and BOD in the lower reaches of the Razdol'naya River in 1983–2007.

distribution pattern of saprobity index in the middle reaches varied slightly within the 20-year-long period. A tendency for a drop in saprobity index is still seen for the river part from the China boundary to the confluence with the Borisovka River upstream Ussuriisk. Near Ussuriisk and downstream, there is a new rise in saprobity index, which was greater in 1989 than in 2009.

DISCUSSION

Rivers of Primorskii krai are characterized by similar natural–climatic conditions and water regimes. In connection with this, water mineralization may be used as an indicator of anthropogenic impact, because municipal and industrial wastewater contains more dissolved salts when compared to ultrafresh river water of the southern part of the Far East [14]. Water and periphyton samples were taken from the studied rivers at similar water regimes, so the revealed variations in mineralization of small rivers and water streams within the specified groups (Fig. 2a) reflect the local variability of anthropogenic impact and landscape features of drainage areas. For example, the Borisovka River is characterized by a water mineralization of 92 mg/L (mean mineralization for the group is 57 mg/L), which corresponds to the greater agricultural development of its catchment area and higher population density. The effect of anthropogenic impact on mineralization is confirmed by the fact that it grows in areas downstream from the settlements [14, 15]. The mineralization of the examined river water is still lower than 150 mg/L at MPC 1000 mg/L [6]. The quality of river water in the Primorskii krai is satisfactory despite the rise in water mineralization and the content of macroions as a result of anthropogenic impact.

Specific features of the distribution pattern of the content of dissolved nitrogen compounds (lowest content in mountain rivers of the southwestern and the southeastern regions, high content in rivers of the west-

ern region, and greatest content in the Razdol'naya River) are related to plain type of rivers on the western macroslope and different development levels of catchment areas. Among dissolved phosphorus compounds, only the content of the organic phosphorus compounds is considerably higher in the Razdol'naya River when compared to other rivers. This testifies obviously to the greater discharge of communal and agricultural waste water. Despite the different anthropogenic impact, the content of biogenic substances in all rivers of the Primorskii krai remains lower than MPC (Table 2). The sole exception is represented by COD, whose content exceeds MPC in some water streams (15 mg O₂/L).

The significant correlations between COD and the content of dissolved organic phosphorus and between the contents of ammonium and nitrate nitrogen are only seen in the Razdol'naya River (Figs. 3a, 3b). This reflects the obviously similar anthropogenic genesis of a great number of biogenic substances, including dissolved nitrogen compounds, in this river contrary to the other studied water flows. A correlation between COD and ammonium nitrogen is also revealed in rivers of the western and the southeastern regions (Fig. 3c), which testifies to sensitivity of these parameters to anthropogenic impact.

Therefore, the Razdol'naya River with greatest population density in its catchment area is characterized by the most pronounced anthropogenic transformation of its hydrochemical features. For the other studied water flows, a correlation between water chemical composition and population density is not revealed. This is even the case for the content of ammonium nitrogen and COD, which are most sensitive to anthropogenic impact. Low general population density in Primorskii krai is a possible reason of the absence of this correlation. A close relationship between population density and contamination rate of

river water may be only revealed for more populated areas [24].

Growth characteristics of periphyton algae differ considerably within the specified regions. The smallest alga amount (lower than 10 milliard cells/m²) and biomass (lower than 10 g/m²) are typical for the purest small mountain rivers and lower reaches of the Razdol'naya River. At moderate contamination levels, these characteristics rise to 146 milliard cells/m² and 64 g/m², respectively. These differences make it difficult to use alga number and biomass for water quality assessment. It may be assumed that indexes of species diversity (those calculated from number of diatoms, H_{Bac} in particular) are more promising. In small water streams with low water quality (the Vassianovka, Sorochevka, Novorudnaya, and Nezhinka rivers), a drop in H_{Bac} is revealed (Figs. 4a–4c). Nevertheless, the H_{Bac} index in the Razdol'naya River is rather high (Fig. 4g), which restricts its use as an indicator of river-water quality [19]. We have not revealed statistically significant correlations between hydrochemical characteristics and alga number or index of species diversity.

Saprobity indexes S are most informative indicators of river water status in Primorskii krai, which corresponds to data obtained in other regions [7, 17, 26]. According to the approach by Pantle and Buck modified by Sladeczek, all the investigated rivers are assigned to oligo- and β -mesosaprobic zones and are classified as pure or slightly contaminated water flows of the second or the third classes. Indexes S are sufficiently stable within the specified groups of water flows: variation coefficient ranges from 5% in rivers of the southwestern region to 12% in water streams on the western macroslope of the Sikhote-Alin' Ridge. Mean indexes for rivers of different groups do not differ significantly, and a higher value is only obtained for the Razdol'naya River (Table 2). The saprobity index correlates with only one of all hydrochemical characteristics—the content of ammonium nitrogen (Fig. 3d)—a most definite indicator of anthropogenic eutrophication of fresh water.

The species composition of periphyton algae was determined several times along the entire part of the Razdol'naya River from the Russian–China boundary to the river mouth within the last 20 years. There are few rivers in the Far East which are as comprehensively studied. A rather high saprobity index in the middle reaches testifies to the continuing input of excessive amount of organic matter from the area of China. Contaminated water is then partially diluted upper Ussuriisk, and discharges from this city play an important role in water contamination in the lower reaches of the river. The smaller rate of the rise in saprobity index in the Razdol'naya River downstream Ussuriisk in 2009 when compared to 1989 agrees with the tendency for a drop in COD as a result of the installation of purification facilities in Ussuriisk (Fig. 5b) [15].

CONCLUSIONS

An analysis of the correlation between hydrochemical characteristics and species composition of periphyton algae in 25 ultrafresh rivers of Primorskii krai has shown that total mineralization, COD, and the content of ammonium compounds of dissolved nitrogen most definitely reflect total anthropogenic impact. The organic compounds of dissolved phosphorus and nitrates may also be used as indicators of high anthropogenic impact (on the Razdol'naya River). The well-pronounced correlation between hydrochemical characteristics and number, biomass, and species diversity of periphyton algae is not revealed for the studied rivers. Only saprobity indexes correlate with the content of ammonium nitrogen. A correspondence between the trend for change in saprobity index in the Razdol'naya River within the last 20 years and the dynamic of input of contaminants to the river is revealed.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Department of Biological Sciences, Russian Academy of Sciences, project no. 12-1-P30-01, and by the Department of Geoscience, Russian Academy of Sciences, project no. 12-1-ONZ-22.

REFERENCES

1. Barinova, S.S., Medvedeva, L.A., and Anisimova, O.V., *Bioraznობrazie vodoroslei—indikátorov okružhayushchei sredy* (Biodiversity of Algae—Environmental Indicators), Tel Aviv: Pilies Studio, Russk. Izd., 2006.
2. *Vodorosli: Spravochnik* (Algae: A Handbook), Kiev: Nauk. Dumka, 1989.
3. Korde, N.V., The technique of biological study of bottom sediments of lakes (fieldwork and biological analysis), in *Zhizn' presnykh vod SSSR* (Life of Freshwaters of the USSR), Moscow: Izd. AN SSSR, 1956, vol. 4, part 1, pp. 383–413.
4. *Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi* (Long-Term Data on the Regime and Resources of Surface Waters), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, vol. 1.
5. Nikulina, T.V., Evaluation of the ecological state of the Razdol'naya River (Primorye, Russia) by the composition of indicator algal species, *Vestn. DVO*, 2006, no. 6, pp. 71–78.
6. Water quality standards for fishery water bodies, including the maximum permissible concentrations of harmful substances in water of fishery water bodies: Order no. 20 of the Federal Agency for Fisheries issued January 18, 2010, *Ros. Gazeta*, March 5, 2010.
7. Pomazkina, G.V. and Shcherbakova, T.A., Species composition of Bacillariophyta of the littoral zone of Lake Baikal (Russia), *Algologiya*, 2010, vol. 20, no. 4, pp. 449–463.
8. *RD 52.18.595-96. Federal'nyi perechen' metodik vypolneniya izmerenii, dopushchennykh k primeneniyu pri*

- vypolnenii rabot v oblasti monitoringa zagryazneniya okruzhayushchei prirodnoi sredy (RD 52.18.595-96. Federal List of Measurement Techniques Allowed for Use in Monitoring Environmental Pollution), Moscow: Federal. Sluzhba Rossii po Gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy, 1996.
9. RD 52.24.564-96. Metod otsenki zagryaznennosti presnovodnykh ekosistem po pokazatelyam razvitiya fitoplanktonnykh soobshchestv Federal'noi sluzhboi Rossii po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy (RD 52.24.564-96. The Method of Assessment of Pollution of Freshwater Ecosystems by the Indices of Development of Phytoplankton Communities by the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring), Moscow: Gidrometeoizdat, 1996.
 10. Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem (Guidelines for Hydrobiological Monitoring of Freshwater Ecosystem), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992.
 11. Sladechek, V., General biological scheme of water quality, in *Sanitarnaya i tekhnicheskaya gidrobiologiya: Mater. I s'ezda Vses. gidrobiol. obshch.* (Sanitary and Technical Hydrobiology: Proc. I All-Union Congr. Hydrobiol. Soc.), Moscow: Nauka, 1967, pp. 26–31.
 12. *Unifitsirovannye metody issledovaniya kachestva vod* (Standardized Methods for Study Water Quality), Part 3: *Metody biologicheskogo analiza vod* (Methods of Biological Water Analysis), Moscow: SEV, 1984.
 13. *Chislennost' naseleniya Primorskogo kraja* (The Population of Primorsky Krai), Vladivostok: Primorskstat, 2011.
 14. Shul'kin, V.M., Bogdanova, N.N., and Perepelyatnikov, L.V., Space–time variations of river water chemistry in RF Southern Far East, *Water Resour.*, 2009, vol. 36, no. 4, pp. 406–417.
 15. Shulkin, V.M. and Semykina, G.I., Assessment of the impact of pollutants from land on the environmental problems of the Peter the Great Bay, in *Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya* (Current Environmental State of the Peter the Great Bay, Sea of Japan), Vladivostok: Izd. Dom Dal'nevost. Fed. Univ., 2012, pp. 252–287.
 16. Barinova, S.S., Anisimova, O.V., Nevo, E., et al., Diversity and ecology of algae from the Nahal Qishon River, northern Israel, *Plant Biosyst.*, 2004, vol. 138, no. 3, pp. 245–259.
 17. Barinova, S.S., Medvedeva, L.A., and Nevo, E., Regional influences on algal biodiversity in two polluted rivers of Eurasia (Rudnaya River, Russia, and Qishon River, Israel) by bioindication and canonical correspondence analysis (CCA), *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 2008, vol. 6, no. 4, pp. 29–59.
 18. Besse-Lototskaya, A., Uncertainty in diatom assessment: sampling, identification and counting variation, *Hydrobiologia*, 2006, no. 566, pp. 247–260.
 19. Blanco, S., Cejudo-Figueiras, C., Tudesque, L., et al., Are diatom diversity indices reliable monitoring metrics?, *Hydrobiologia*, 2012, no. 695, pp. 199–206.
 20. Bukhtiyarova, L.N., *Diatoms of Ukraine. Inland Waters*, Kiev: Nat. Acad. Sci. Ukraine, Inst. Botan., 1999.
 21. Chetelat, J., Pick, F.R., Morin, A., and Hamilton, P.B., Periphyton biomass and community composition in rivers of different nutrient status, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1999, vol. 56, pp. 560–569.
 22. Kolkwitz, R. and Marsson, M., Ökologie der pflanzlichen saprobien, *Ber. Dtsch. Bot. Ges.*, 1908, vol. 26, pp. 505–519.
 23. Lavoie, I., Hamilton, P.B., Wang, Y.K., et al., A comparison of stream bioassessment in Quebec (Canada) using six European and North American diatom-based indices, *Nova Hedwigia*, 2009, vol. 135, pp. 37–56.
 24. Li, S., Gu, S., Liu, W., et al., Water quality in relation to land use and land cover in the upper Han River Basin, China, *Catena*, 2008, vol. 75, pp. 216–222.
 25. Marvan, P., Maršálek, B., Heteša, J., et al., Comments on the revised tables of algal (and other botanical) water quality indicators listed in CSN 75 7716—discussion material for assessment of trophic status of water bodies, 2005. <http://www.cyanobacteria.net>
 26. Nikulina, T.V., Diatom flora of fresh and brackish water bodies of the Sakhalin Island (Far East, Russia), in *Diatoms Diversity and Distribution, Role in Biotechnology and Environmental Impacts*, New York: Nova Sci. Publ., 2013, pp. 35–86.
 27. Pantle, F. and Buck, H., Die biologische überwachung der gewasser und die darstellung der ergebnisse, *Gas- und Wasserfach*, 1955, vol. 96, no. 18, p. 604.
 28. Rimet, F., Recent views on river pollution and diatoms, *Hydrobiologia*, 2012, no. 683, pp. 1–24.
 29. Shannon, C.B. and Weaver, W., *The mathematical theory of communication. Urbana: Univ. Illinois Press*, 1963, p. 345.
 30. Sládeček, V., System of water quality from the biological point of view, *Arch. Hydrobiol. Ergebn. Limnol.*, 1973, vol. 7, pp. 1–218.
 31. Sládeček, V., Diatoms as indicators of organic pollution, *Hydrochim., Hydrobiol.*, 1986, vol. 14, no. 5, pp. 555–566.
 32. Van Dam, H., Mertens, A., and Sinkeldam, J., A Coded Checklist and Ecological Indicators Values of Freshwater Diatoms from the Netherlands, *Netherlands J. Aquat. Ecol.*, 1994, vol. 28, no. 1, pp. 117–133.

Translated by I. Bel'chenko

ФИТОПЛАНКТОН, ФИТОБЕНТОС,
ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 504.453:556.531+581.526.323[571.63]

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕЧНЫХ ВОД
ПРИМОРСКОГО КРАЯ РФ ПО ХИМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ
И СОСТАВУ ВОДОРΟΣЛЕЙ ПЕРИФИТОНА

© 2015 г. В. М. Шулькин*, Т. В. Никулина**

*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
690041 Владивосток, ул. Радио, 7,
e-mail: shulkin@tig.dvo.ru

**Биолого-почвенный институт ДВО РАН,
690022 Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159

Поступила в редакцию 03.04.2013 г.

Проанализированы данные по химическому составу вод и видовому составу водорослей перифитона в 25 реках Приморского края РФ с различным уровнем антропогенной нагрузки. Показано, что ХПК и содержание аммонийных форм растворенного азота – наиболее однозначные показатели общей антропогенной нагрузки. В р. Раздольная, где антропогенная эвтрофикация максимальна, ее индикаторами могут также выступать органические формы растворенного фосфора и нитраты. Численность и биомасса водорослей перифитона весьма изменчива даже в пределах однотипных водотоков. Видовой состав водорослей и рассчитанный на его основе индекс сапробности более стабильны. Индекс сапробности демонстрирует меньшую пространственную изменчивость по сравнению с показателями химического состава. Тем не менее, наблюдается корреляционная связь между индексом сапробности и содержанием аммонийных форм азота, а также соответствие между трендом изменения индекса сапробности в р. Раздольная за последние 20 лет и динамикой поступления в реку загрязнений.

Ключевые слова: химический состав вод, биогенные вещества, качество вод, водоросли перифитона, индекс сапробности, реки Приморья.

DOI: 10.7868/S0320965215010143

ВВЕДЕНИЕ

Оценка качества пресных вод по химическим и биологическим показателям введена в систему мониторинга Госкомгидрометом РФ в 1972 г. [9, 10]. В качестве биологических индикаторов состояния пресных вод используют характеристики планктона, перифитона, зообентоса и рыб [10]. К наиболее разработанным относятся методики изучения отклика водорослей перифитона и планктона на загрязнение водоемов и водотоков. История применения водорослей перифитона для оценки сапробности (степени органического загрязнения водоемов) насчитывает >100 лет [22]. В странах ЕС и США разработано более двух десятков индексов для оценки степени загрязнения вод с использованием водорослей (в основном диатомовых) в качестве биоиндикаторов [18, 23, 28]. Однако многообразие биологических индикаторов ограничивает возможности проведения сравнительного анализа результатов. Кроме того, большое значение имеет соответствие между гидробиологическими показателями и химическим составом вод, но работ по комплексной оценке

состояния водных экосистем недостаточно [16, 21]. Очевидно, что согласованность или определение степени несогласованности между химическими и гидробиологическими показателями может значительно повысить надежность и экологическую обоснованность оценки качества вод, а также выявить наиболее адекватный набор индикаторов состояния водных объектов.

Цель работы – комплексный анализ химического состава вод и состояния водорослей перифитона рек Приморья с различным уровнем антропогенной нагрузки для выделения наиболее информативных маркеров качества речных вод; оценка по этим показателям тенденции изменения состояния наиболее антропогенно нагруженного водотока региона – р. Раздольная за последние 20 лет.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В весенне-летний период 2009–2011 гг. отобраны пробы перифитона и воды с 43 станций на 25 реках Приморского края, включая крупные реки (Бикин, Большая Уссурка, Раздольная) и

Таблица 1. Краткая характеристика водотоков Приморья

Район	Река	Площадь бассейна, км ²	Среднегодовой расход воды*, м ³ /с	Плотность населения**, чел./км ²
Юго-западный	Цукановка	170	3.9	4.3
	Рязановка	148	2.7	
	Пойма	85	1.7	
	Кедровая	56	0.8	
	Амба	242	6.1	
	Нежинка	76	0.91	
	Борисовка	1560	7.8	
Юго-восточный	Артемовка	894	6.3	8.5
	Шкотовка	706	5.7	
	Литовка	107	1.07	
	Новорудная	25	0.25	
	Екатериновка	44	0.44	
	Падь Широкая	9.6	0.10	
	Мананкина	22	0.18	
	Симонова	1.9	0.02	
	Снегуровка	473	2.4	
Западный (склон Сихотэ-Алиня)	Вассиановка	233	1.2	13.1
	Черниговка	121	0.61	
	Медведица	42	0.34	
	Сорочевка	114	0.57	
	Золотой	46	0.37	
	Кабарга	763	7.6	
	Бассейн рек			
Раздольная	Раздольная	16800	71.9	29.9
Большая Уссурка	Б. Уссурка	29500	351	2.2
Бикин	Бикин	21400	238	1.4

* Рассчитан по работе [4].

** Данные 2010 г. по работе [13].

малые водотоки, расположенные в районах с различным уровнем хозяйственного освоения (табл. 1). В качестве меры антропогенной нагрузки использована плотность населения административных единиц, расположенных на водосборах [13]. Для изученной территории Приморья выделены три природно-хозяйственных района (юго-западный, юго-восточный, западный), а также участки водосборов рек Раздольная, Б. Уссурка и Бикин. Река Раздольная, в которой видовой состав альгофлоры детально изучен в 1989–1997 гг. [5], обследована в мае и в августе 2009 г. Пробы отбирали на станциях 4–6 нижнего течения, расположенных на участке от границы с КНР до устьевой зоны (рис. 1).

На месте отбора проб проводили фильтрацию воды через капсульные фильтры GWV Pall™ с раз-

мером пор 0.45 мкм, измерения рН и электропроводности. Фильтраты консервировали хлороформом и анализировали в стационарной лаборатории, используя стандартные спектрофотометрические и хроматографические методы определения нитратного и аммонийного азота, минеральных и органических форм растворенного фосфора, растворенного кремния и содержания макроионов [8]. Для определения ХПК использовали нефилтрованную воду.

Пробы водорослей отбирали по стандартным методикам [2, 12], камеральную обработку проводили под световыми микроскопами Axioskop 40 (“Zeiss”, объективы ×40/0.65 и ×100/1.25 oil) и Alphaphot-2 YS-2 (“Nikon”, объективы ×40/0.65 и ×100/1.25 oil), для определения видовой принадлежности водорослей использовали современные

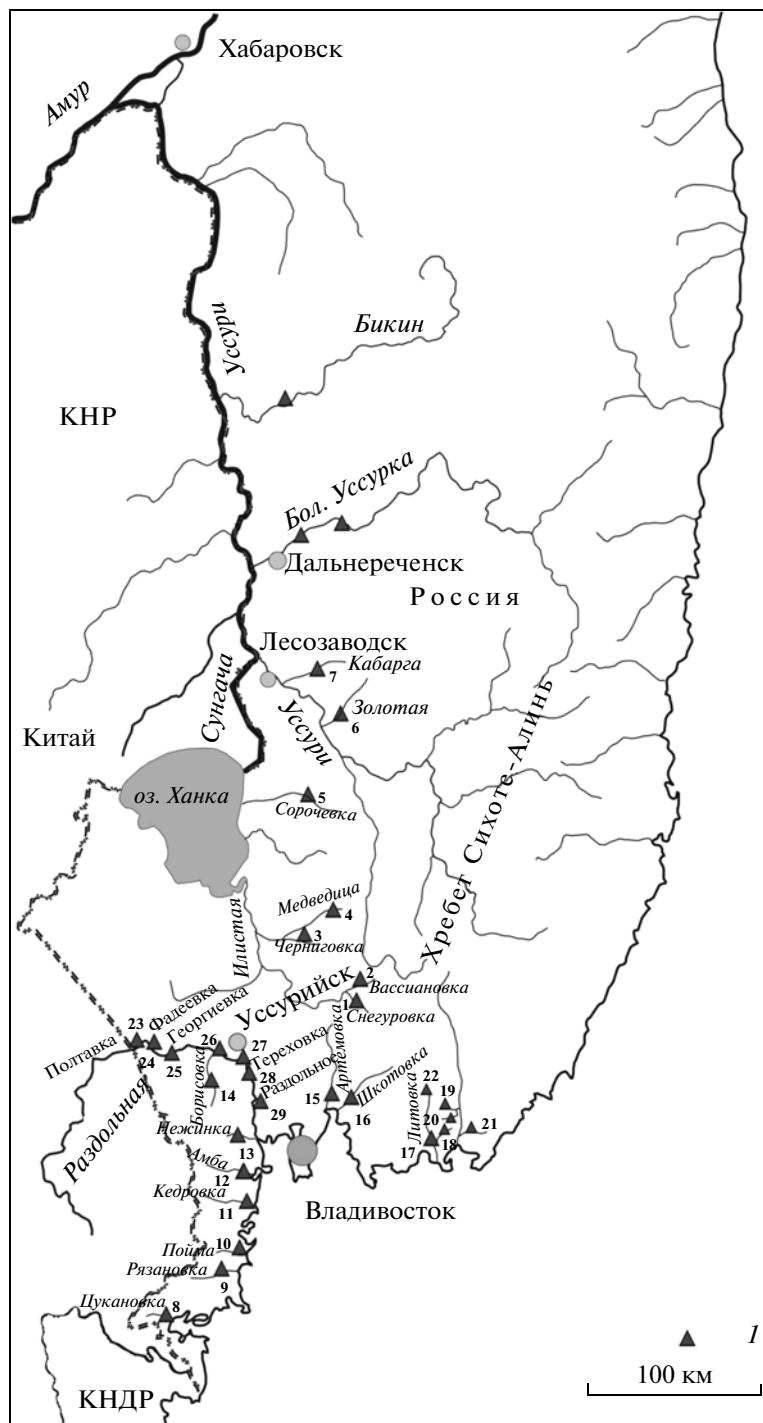


Рис. 1. Схема района работ: 1 – места отбора проб воды и водорослей перифитона; 1 – Снегуровка, 2 – Вассиановка, 3 – Черниговка, 4 – Медведица, 5 – Сорочевка, 6 – Золотая, 7 – Кабарга, 8 – Цукановка, 9 – Рязановка, 10 – Пойма, 11 – Кедровая, 12 – Амба, 13 – Нежинка, 14 – Борисовка, 15 – Артемовка, 16 – Шкотовка, 17 – Литовка, 18 – Новорудная, 19 – Екатериновка, 20 – Падь Широкая, 21 – Мананкина, 22 – Симонов, 23 – Полтавка, 24 – Фадеевка, 25 – Георгиевка, 26 – Борисовка, 27 – Уссурийск, 28 – Тереховка, 29 – Раздольное.

Таблица 2. Гидрохимическая и сапробиологическая характеристика речных вод исследованных районов Приморья (средние величины со стандартным отклонением)

Показатель	Район			Река		ПДК (по работе [9])
	Юго-восточный	Юго-западный	Западный	Раздольная	Б. Уссурка, Бикин	
Количество проб	10	7	12	11	3	
Электропроводность, мкСм/см	58 ± 18	56 ± 19	67 ± 26	101 ± 20	44 ± 2	–
Минерализация, мг/л	57 ± 19	57 ± 22	72 ± 28	91 ± 17	52 ± 3	1000
NH ₄ ⁻ , мг N/л	0.04 ± 0.03	0.02 ± 0.02	0.08 ± 0.08	0.09 ± 0.07	0.07 ± 0.02	0.4
NO ₃ ⁻ , мг N/л	0.32 ± 0.24	0.05 ± 0.08	0.12 ± 0.19	0.33 ± 0.24	0.17 ± 0.06	9.1
P _{мин} , мкг/л	12 ± 7	6 ± 3	7 ± 5	13 ± 11	7 ± 5	50
P _{орг} , мкг/л	11 ± 4	7 ± 3	11 ± 3	21 ± 5	12 ± 10	–
Si, мг/л	5.4 ± 1.5	7.3 ± 2.6	6.2 ± 2.3	4.1 ± 2.6	5.3 ± 0.3	–
ХПК, мг O/л	8.8 ± 2.9	4.3 ± 3.2	17.5 ± 10.8	19.5 ± 8.7	13.2 ± 2.0	15
Индекс сапробности	1.41 ± 0.15	1.42 ± 0.08	1.52 ± 0.18	1.58 ± 0.09	1.45 ± 0.16	–

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения показателя, значимо различающиеся по критерию Манна–Уитни.

систематические сводки. Биомассу водорослей определяли счетно-объемным методом [2]. При оценке структуры альгоценозов выявлены комплексы преобладающих видов с учетом частоты их встречаемости по шестибалльной шкале [3]. К доминантам отнесены таксоны с частотой встречаемости 6 (“масса”), к субдоминантам – с оценкой обилия 5 (“очень часто”), при отсутствии видов с высокими показателями обилия преобладающими считали таксоны с максимальной частотой встречаемости. Видовое разнообразие водорослей оценивали с помощью индекса Шеннона–Уивера [29], рассчитанного по общей численности (H) и численности диатомовых ($H_{\text{Вас}}$). Индексы сапробности (S) определены методом Пантле–Букк [27] в модификации Сладечека [11, 30] по составу видов-индикаторов органического загрязнения. Для определения отношения вида к сапробиологической группе и его индикаторной значимости использовали литературные данные [1, 12, 20, 25, 31, 32].

При статистической обработке использовали пакет MiniTab 14, при оценке достоверности различия средних – непараметрический критерий Манна–Уитни для малых выборок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Воды рек Приморского края, как правило, относятся к ультрапресным (минерализация <100 мг/л) с гидрокарбонатно-кальциевым или гидрокарбонатно-кальциево-натриевым типом минерализации (табл. 2). В пределах выделенных

районов минерализация речных вод и прямо связанная с ней электропроводность изменяются в 2–3 раза, оставаясь при этом <100 мг/л и <100 мкСм/см соответственно (рис. 2а). Исключение составляют реки Медведица и Вассиановка с минерализацией 115 и 137 мг/л, расположенные на западном макросклоне хр. Сихотэ-Алинь и дренирующие хозяйственно освоенные водосборы. В р. Раздольная минерализация и содержание всех макроионов также значимо выше, чем в большинстве других исследованных рек (табл. 2). Содержание макроионов, особенно катионов, коррелирует с величиной минерализации во всех изученных водотоках (рис. 2б–2г).

Концентрация биогенных веществ в изученных реках более изменчива, чем минерализация или содержание макроионов (рис. 3). Исключение составляет растворенный кремний, коэффициент вариации которого для всей выборки равен 41%, что сравнимо с вариабельностью минерализации и макроионов (табл. 2). Коэффициенты вариации концентрации растворенных форм N и P в реках Приморья >100%. Минимальная средняя концентрация аммонийного азота отмечена в реках юго-западного и юго-восточного районов, повышенная – в водотоках западного макросклона хр. Сихотэ-Алинь, максимальная – в р. Раздольная. Для рек юго-восточного и юго-западного районов также характерны невысокие величины ХПК, тогда как в р. Раздольная и половине рек западного макросклона ХПК существенно выше (табл. 2).

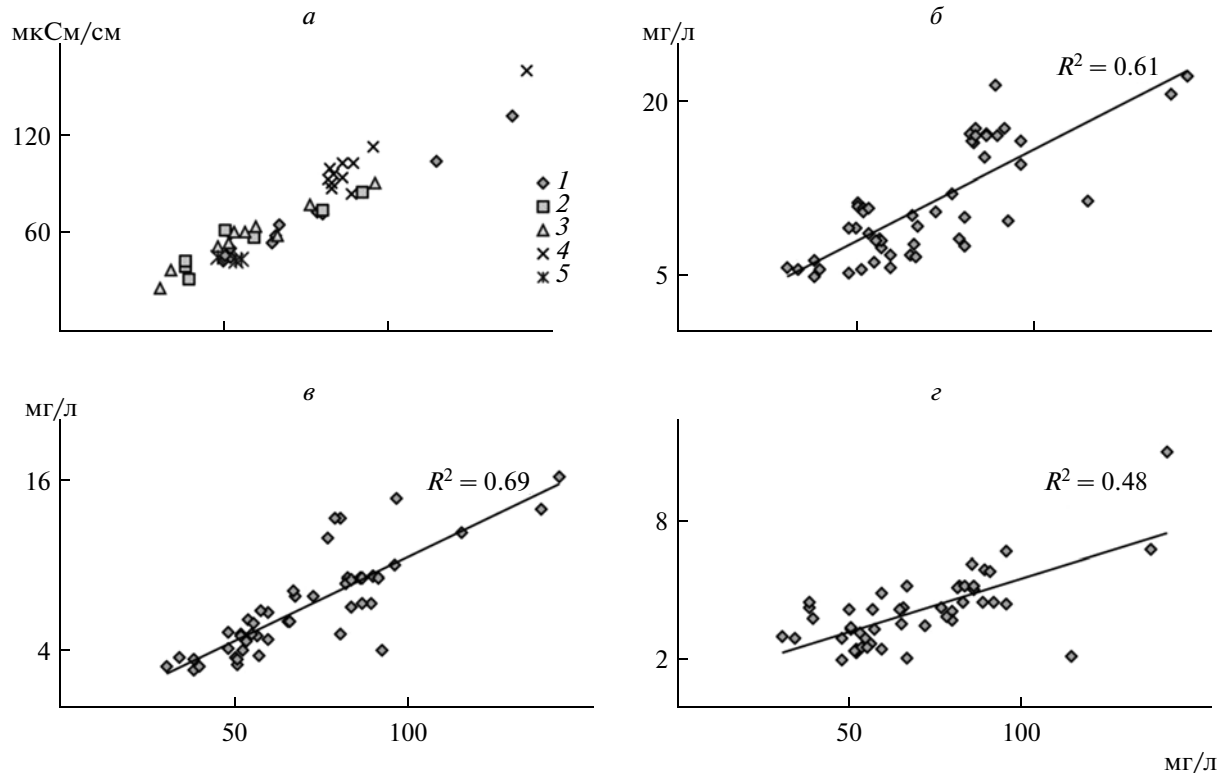


Рис. 2. Связь минерализации (ось абсцисс) и электропроводности (а) рек западного (1), юго-западного (2), юго-восточного (3) участков Приморья, рек Раздольная (4), Бикин и Большая Уссурка (5), а также зависимость концентрации макроионов SO_4 (б), Ca (в), Na (г) от минерализации.

Только в р. Раздольная отмечена положительная связь между ХПК и концентрацией растворенного органического фосфора, а также между содержанием аммонийного и нитратного азота (рис. 3а и 3б). Связь ХПК с аммонийным азотом обнаружена еще и в реках западного и юго-восточного районов Приморья (рис. 3в).

В составе перифитона водотоков Приморья выявлено 163 вида (с учетом видов, разновидностей и форм – 170 таксонов) водорослей, относящихся к шести отделам: Cyanoprokaryota, Chrysophyta, Xanthophyta, Bacillariophyta, Rhodophyta и Chlorophyta. Наиболее разнообразны диатомовые и зеленые водоросли, составляющие соответственно 82 и 12% общего списка альгофлоры. Наибольшее количество видов, разновидностей и форм содержат роды *Gomphonema* – 15, *Nitzschia* – 13, *Navicula* – 10 и *Eunotia* – 9.

Высокая частота встречаемости отмечена для 31 вида синезеленых, диатомовых и зеленых водорослей (табл. 3). В основном это индифференты по отношению к солености, алкалофилы, бентосные и широко распространенные виды, олиго- и β-мезосапробы. В пределах каждого из трех природно-хозяйственных районов в перифитоне водотоков наблюдается сходство состава преобладающих диатомовых комплексов и массовое раз-

витие представителя синезеленых (*Homoeothrix varians*). В реках западного склона хр. Сихотэ-Алинь к числу доминирующих чаще всего относятся *Gomphonema olivaceum* и *Achnanthes minutissimum*, юго-западного Приморья – *Nitzschia paleacea* и *Cymbella affinis*, юго-восточного Приморья – *G. olivaceum* и *Encyonema silesiaca*.

В водотоках Приморья представлены как полидоминантные, так и монодоминантные альгосообщества. Это подтверждается широкими и перекрывающимися интервалами индексов видового разнообразия. Величины H составили 0.80–3.79 в реках юго-западной части, 0.89–3.23 – юго-восточной, 0.80–3.20 – западной, а величины $H_{\text{Вас}}$ – 2.05–4.02, 1.02–2.45 и 1.57–4.11 соответственно. На разных участках р. Раздольная значения H варьируют от 1.05 до 3.92, $H_{\text{Вас}}$ – от 3.36 до 4.18 (рис. 4).

По численности в составе альгоценозов преобладали синезеленые, по биомассе – диатомовые водоросли. Общие численность и биомасса значительно варьировали в реках разных районов (рис. 4). Наиболее низкие показатели (от 0.16 до 8.3 млрд кл./м² и от 0.2 до 0.6 г/м²) отмечены для малых горных водотоков юго-восточной части Приморья. Исключение в этой группе составила малая равнинная р. Мананкина, дренирующая

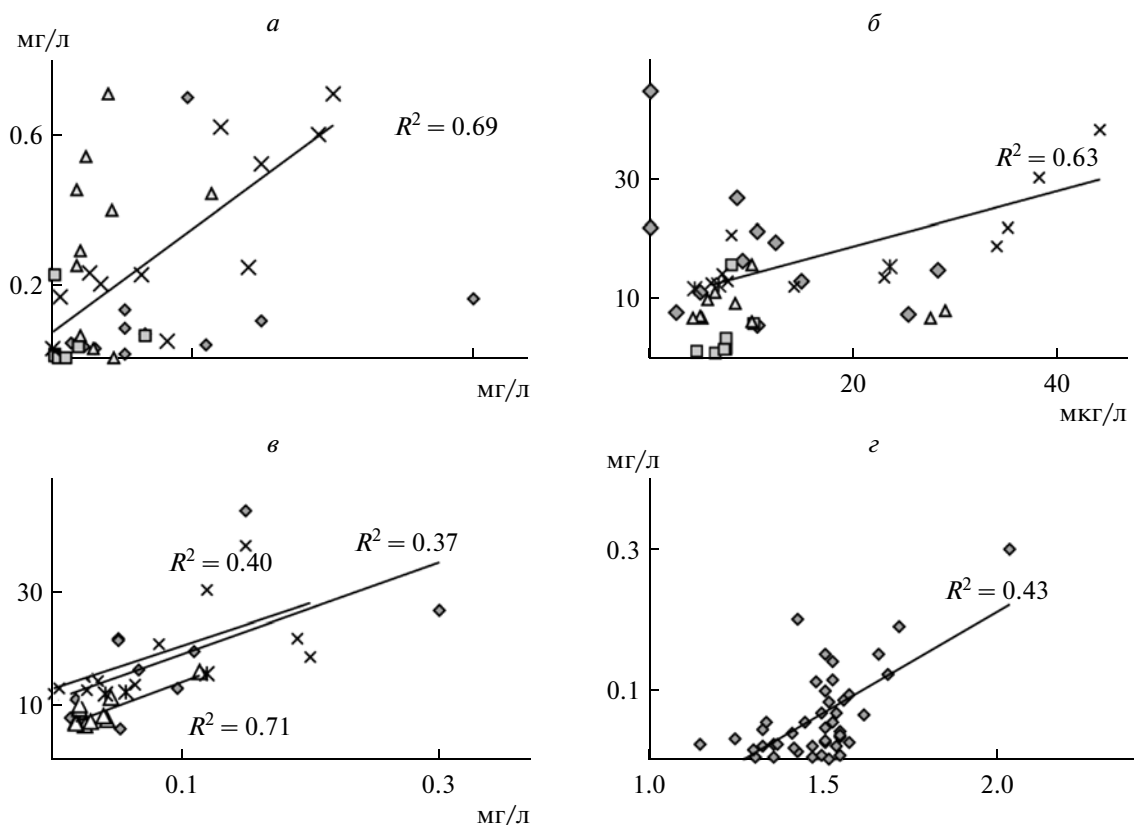


Рис. 3. Связь аммонийных (ось абсцисс) и нитратных (ось ординат) форм азота (*а*); ХПК (ось ординат) и органических форм фосфора (ось абсцисс) (*б*); ХПК (ось ординат) и аммонийных форм азота (ось абсцисс) (*в*) в различных реках Приморья, а также связь между содержанием аммонийного азота (ось ординат) и индексом сапробности (ось абсцисс) (*г*). Остальные обозначения, как на рис. 2.

антропогенно освоенный водосбор (рис. 4*б*). В р. Раздольная численность и биомасса изменялись в пределах 0.15–8.0 млрд кл./м² и 0.02–18.2 г/м² соответственно (рис. 4*з*).

К показателям сапробности воды относятся 109 видов и разновидностей водорослей, или 75% общего числа таксонов. Самые многочисленны — олиго- (30%) и β-мезосапробы (27%). Индексы сапробности изменялись от 1.15 до 2.04 (рис. 3*г*).

Сравнение результатов определения видового состава водорослей перифитона по течению р. Раздольная от российско-китайской границы до устья в 1989 г. [5] и 2009 г. (рис. 5*а*) показывает, что величина и характер распределения индекса сапробности в среднем течении реки за последние 20 лет изменились мало. По-прежнему наблюдается тенденция к снижению величины индекса сапробности от границы с КНР до слияния с р. Борисовкой выше г. Уссурийска. В районе г. Уссурийска и ниже по течению величина индекса сапробности вновь возрастает. При этом в 2009 г. степень увеличения индекса сапробности была меньше, чем в 1989.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При близких природно-климатических условиях и водном режиме рек Приморья минерализация может служить показателем антропогенной нагрузки, поскольку коммунальные и промышленные стоки содержат больше растворенных солей, чем ультрапресные речные воды юга Дальнего Востока [14]. Пробы воды и перифитона в исследованных реках отобраны при сходном водном режиме, поэтому наблюдаемые вариации минерализации малых рек и водотоков в пределах выделенных групп (рис. 2*а*) отражают локальную изменчивость антропогенной нагрузки и ландшафтные особенности водосборов. Например, среди рек юго-западного Приморья выделяется р. Борисовка с минерализацией 92 мг/л (при средней для группы 57 мг/л), что соответствует большей сельскохозяйственной освоенности ее водосбора и большей плотности населения. Влияние антропогенной нагрузки на минерализацию подтверждается увеличением последней на участках, расположенных ниже населенных пунктов [14, 15]. При этом минерализация изученных речных вод продолжает оставаться <150 мг/л при

Таблица 3. Преобладающие виды водорослей перифитона в реках Приморья и их эколого-географическая и сапробиологическая характеристики

Вид	Сапробность	Индекс сапробности	Местообитание	Галобность	pH	Распространение
Цианопрокaryota						
<i>Calothrix braunii</i> Bornet et Flahault	o	1.0	B	—	—	a—a
<i>Chamaesiphon confervicola</i> A. Braun	χ — β	0.9	B	—	—	k
<i>Homoeothrix varians</i> Geitler	o	1.0	B	—	—	—
<i>Phormidium autumnale</i> (Agardh) Gomont	β	2.1	B	—	—	k
<i>Tolypothrix distorta</i> Kützing ex Bornet et Flahault	o	1.2	B	—	—	k
<i>T. tenuis</i> Kützing	χ — β	0.8	B	i	—	k
Bacillariophyta						
<i>Achnantheidium minutissimum</i> (Kützing) Czarnecki	b	2.2	B	i	i	k
<i>Asterionella formosa</i> Hassall	o	1.0	P	i	alf	k
<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg var. <i>euglypta</i> (Ehrenberg) Grunow	b	—	B	i	alf	k
<i>Cymbella affinis</i> Kützing	β —o	1.7	B	i	alf	k
<i>C. tumida</i> (Brébisson) Van Heurck	x	0.2	B	i	alf	b
<i>C. turgidula</i> Grunow	—	—	B	—	i	k
<i>Encyonema caespitosum</i> Kützing	β — α	—	B	i	—	k
<i>E. silesiacum</i> (Bleisch) Mann	χ —o	0.5	B	i	i	k
<i>Fragilaria capucina</i> Desmazières	o— β	1.5	B—P	i	alf	k
<i>Gomphoneis olivaceum</i> (Hornemann) Dawson ex Ross et Sims	β	2.0	B	i	alf	k
<i>Gomphonema angustatum</i> (Kützing) Rabenhorst	b	2.0	B	i	alf	k
<i>Hannaea arcus</i> (Ehrenberg) Patrick	x	0.3	B	i	alf	a—a
<i>Melosira varians</i> Agardh	α — β	2.7	B—P	i	alf	k
<i>Meridion circulare</i> (Greville) Agardh	o— χ	0.8	B	hb	alf	k
<i>Navicula avenaceae</i> (Brébisson et Godey) Brébisson	o— β	1.4	B	i	alf	k
<i>N. cryptocephala</i> Kützing	x	0.2	B—P	i	alf	k
<i>N. radiosa</i> Kützing	o	1.5	B	i	i	k
<i>Nitzschia brevissima</i> Grunow	β	—	B	i	i	—
<i>N. dissipata</i> (Kützing) Grunow	χ	0.2	B	i	alf	b
<i>N. palea</i> (Kützing) W. Smith	α — β	2.75	B	i	i	k
<i>N. paleacea</i> (Grunow) Grunow	β	2.2	B—P	i	alf	k
<i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compère	o— α	1.9	B	i	alf	k
<i>U. inaequalis</i> (H. Kobayasi) M. Idei	—	—	B	—	—	—
Chlorophyta						
<i>Draparnaldia plumosa</i> (Vaucher) Agardh	β —o	1.6	B	—	—	—
<i>Microspora stagnorum</i> (Kützing) Lagerheim	β —o	1.6	P	—	—	—

Примечание. Сапробность: χ – ксеносапроб, χ —o – ксено-олигосапроб, o— χ – олиго-ксеносапроб, χ — β – ксено-бетамезосапроб, o – олигосапроб, o— β – олиго-бетамезосапроб, β —o – бета-олигомезосапроб, o— α – олиго-альфамезосапроб, β – бетамезосапроб, β — α – бета-альфамезосапроб, α — β – альфа-бетамезосапроб. Местообитание: P – планктонные, B—P – бентосно-планктонные, B – бентосные. Галобность: hb – галофоб, i – индифферент. Отношение к pH: alf – алкалофил, i – индифферент. Распространение: a—a – аркто-альпийский, b – бореальный, k – космополит.

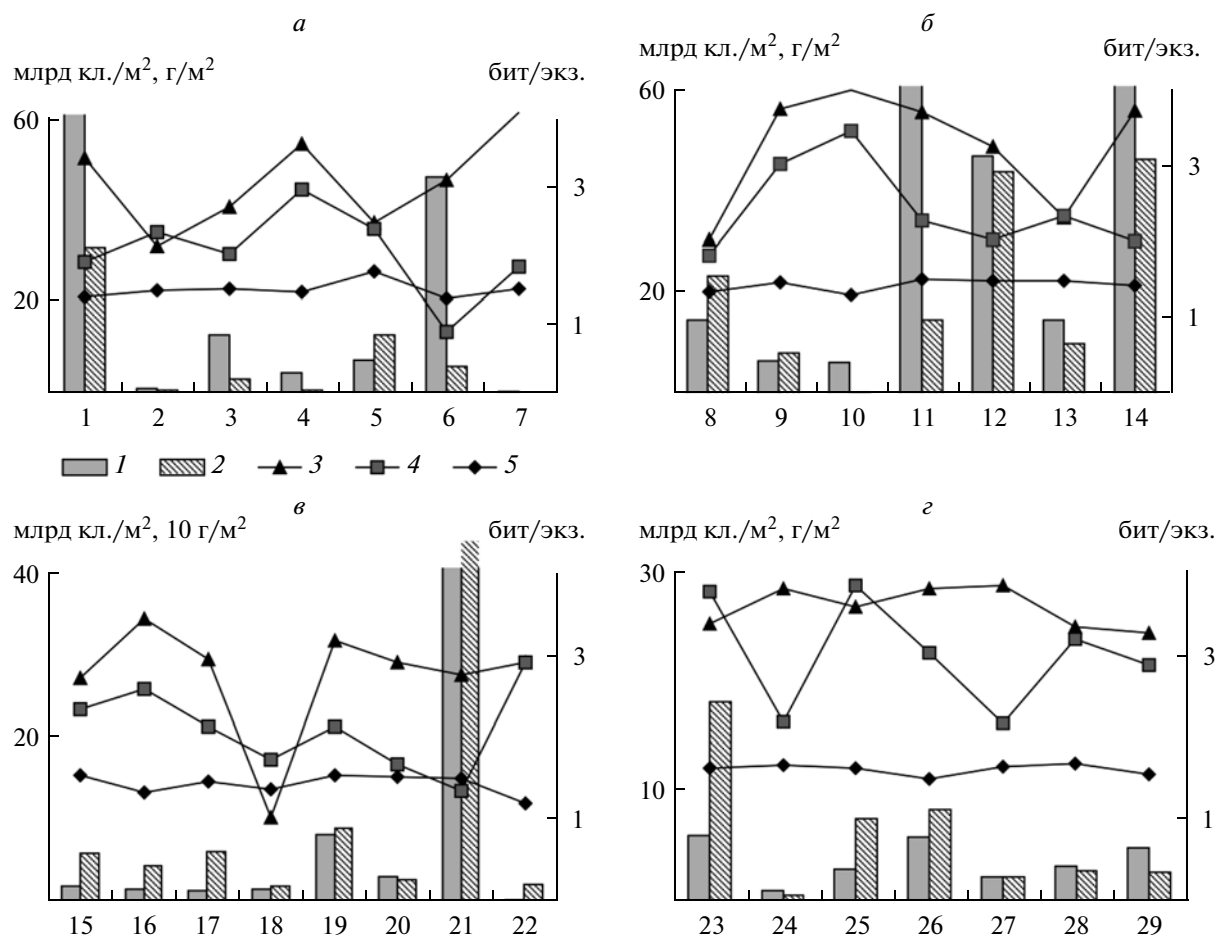


Рис. 4. Соотношение численности (1, млрд кл./м²) и биомассы (2, г/м²) водорослей перифитона с индексами (бит/экз.): сапробности (3), Шеннона–Уивера для диатомовых сообществ (5), Шеннона–Уивера для альгосообществ с учетом всех отделов (4) рек западного склона Сихотэ-Алинь (а), юго-западного (б) и юго-восточного (в) Приморья и р. Раздольная (г) в 2009–2011 гг. По оси абсцисс – номера рек, как на рис. 1.

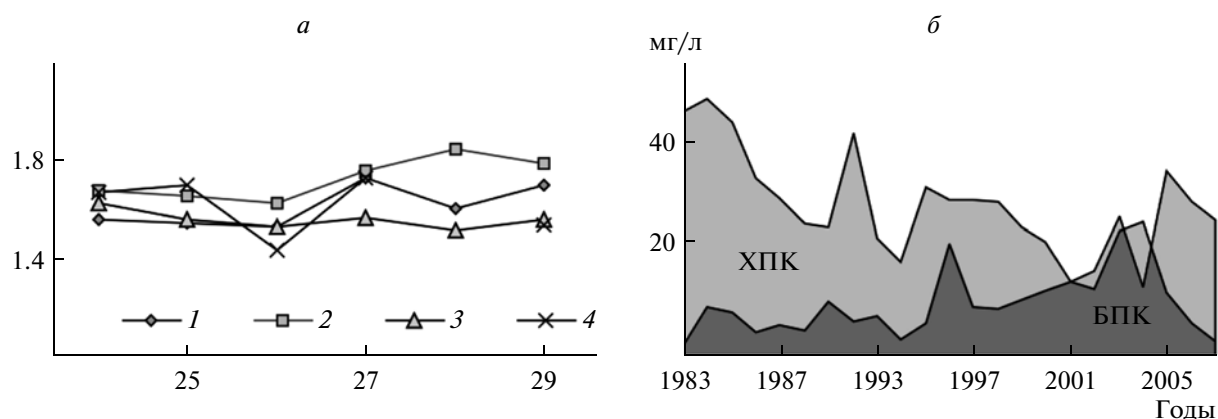


Рис. 5. Изменение индекса сапробности вод р. Раздольная от границы РФ/КНР через г. Уссурийск (ст. 27) до с. Раздольное (ст. 29) в 1989 (1, 2) и 2009 гг. (3, 4) (а) и изменчивость среднегодовых значений ХПК и БПК в нижнем течении р. Раздольная с 1983 по 2007 гг. (б).

ПДК 1000 мг/л [6]. Таким образом, хотя антропогенная нагрузка и вызывает увеличение минерализации и содержания макроионов, качество речных вод Приморья не вызывает нареканий.

Особенности распределения концентрации растворенных форм азота (минимальный уровень в горных реках юго-западного и юго-восточного районов, повышенный в реках западной части и максимальный в р. Раздольная) обусловлены как более равнинным характером рек западного макросклона, так и различным уровнем хозяйственного освоения водосборов. Из растворенных форм Р лишь количество органических форм в р. Раздольная значимо выше, чем в остальных водотоках, что отражает, вероятно, повышенную роль бытовых и сельскохозяйственных стоков. Несмотря на различие антропогенной нагрузки, содержание биогенных веществ во всех реках Приморского края продолжает оставаться значительно ниже ПДК (табл. 2). Единственный параметр, который превышает в ряде водотоков ПДК (15 мг O_2 /л), – ХПК.

Значимая корреляция между ХПК и концентрацией растворенного органического фосфора и между содержанием аммонийного и нитратного азота, наблюдаемая только в р. Раздольная (рис. 3а и 3б) отражает, вероятно, единый антропогенный генезис широкого круга биогенных веществ, включая растворенные формы азота в этой реке в отличие от других изученных водотоков. Связь ХПК с аммонийным азотом обнаружена еще и в реках западного и юго-восточного районов Приморья (рис. 3в), что указывает на повышенную чувствительность к антропогенной нагрузке именно этих параметров.

Таким образом, в р. Раздольная при максимальной плотности населения на ее водосборе обнаружены наиболее выраженные признаки антропогенной трансформации гидрохимических характеристик. Попытки соотнести химический состав вод других изученных водотоков с плотностью населения на их водосборах не дали результата даже для данных по концентрации аммонийного азота и ХПК – параметров, наиболее чувствительных к антропогенному воздействию. Общая невысокая плотность населения на территории Приморья – вероятная причина такой неопределенности. Регионы, где удастся установить однозначную связь между населенностью и уровнем загрязнения речных вод, более обжиты [24].

Показатели развития водорослей перифитона существенно различаются в исследованных водотоках даже в пределах выделенных районов. Для наиболее чистых горных малых рек и для низовьев р. Раздольная характерны минимальные численность (до 10 млрд кл./м²) и биомасса (до 10 г/м²) водорослей. При промежуточном уровне загрязнения эти показатели могут дости-

гать 146 млрд кл./м² и 64 г/м² соответственно. Такие различия затрудняют использование численности и биомассы для оценки качества вод. Можно предположить, что более перспективны индексы видового разнообразия, в частности рассчитанные по численности диатомовых водорослей $H_{\text{Вас}}$. В малых водотоках с пониженным качеством вод (реки Вассиановка, Сорочевка, Новорудная, Нежинка) отмечено снижение величин $H_{\text{Вас}}$ (рис. 4а–4в). Однако в р. Раздольная индекс $H_{\text{Вас}}$ достаточно высок (рис. 4г), что ограничивает возможности его использования в качестве показателя чистоты речных вод [19]. Статистически значимых связей с гидрохимическими параметрами ни для численности водорослей, ни для индекса видового разнообразия не обнаружено.

Наиболее успешным показателем состояния речных вод Приморья оказались индексы сапробности S , что согласуется с данными по другим регионам [7, 17, 26]. Согласно оценке качества вод по методу Пантле-Букк в модификации Сладечка, все обследованные водотоки относятся к олиго- и β -мезосапробной зонам, классифицируются как чистые и слабо загрязненные воды II и III классов. В пределах выделенных групп водотоков эти показатели достаточно стабильны: коэффициент вариации колеблется от 5% в реках юго-западного участка Приморья до 12% в водотоках западного макросклона хр. Сихотэ-Алинь. Средние значения индекса для рек различных групп также значимо не различаются, и лишь в р. Раздольная получена повышенная величина (табл. 2). Из всех гидрохимических характеристик индекс сапробности связан только с концентрацией аммонийного азота (рис. 3г) – наиболее однозначным показателем антропогенного эвтрофирования пресных вод.

Раздольная – одна из немногих рек юга Дальнего Востока, где состав водорослей перифитона за последние 20 лет неоднократно определялся по всему течению реки от российско-китайской границы до устьевой области. Сохранение достаточно высокой величины индекса сапробности в среднем течении реки свидетельствует о продолжающемся поступлении избыточного количества органических веществ с территории КНР, частичном их разбавлении выше г. Уссурийска, и важной роли стоков г. Уссурийска в формировании уровня загрязнения нижнего течения реки вплоть до устья. Вместе с тем, меньшая степень увеличения индекса сапробности в р. Раздольная ниже г. Уссурийска в 2009 г. по сравнению с 1989 г. совпадает с тенденцией к уменьшению величины ХПК в нижнем течении за счет ввода в эксплуатацию очистных сооружений г. Уссурийска (рис. 5б) [15].

Выводы. Сопряженный анализ гидрохимических характеристик и видового состава водорослей перифитона в 25 ультрапресных реках При-

морского края показал, что общую антропогенную нагрузку наиболее однозначно отражают общая минерализация, ХПК, содержание аммонийных форм растворенного азота. При высокой антропогенной нагрузке (р. Раздольная) ее показателями могут также выступать органические формы растворенного фосфора и нитраты. Для численности, биомассы и видового разнообразия водорослей перифитона исследованных рек не выявлено четкой связи с гидрохимическими характеристиками, лишь индексы сапробности коррелируют с содержанием аммонийного азота. Отмечено соответствие между трендом изменения индекса сапробности в р. Раздольная за последние 20 лет и динамикой поступления в реку загрязнений.

Работа поддержана грантами ОБН РАН №12-1-П30-01 и ОНЗ РАН №12-1-ОНЗ-22.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio – Русское изд-во, 2006. 498 с.
2. Водоросли: Справочник. Киев: Наук. думка, 1989. 608 с.
3. *Кордэ Н.В.* Методика биологического изучения донных отложений озер (полевая работа и биологический анализ) // Жизнь пресных вод СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. Т. 4. Ч. 1. С. 383–413.
4. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 1. Вып. 21. 387 с.
5. *Никулина Т.В.* Оценка экологического состояния реки Раздольной (Приморье, Россия) по составу индикаторных видов водорослей // Вестн. ДВО. 2006. № 6. С. 71–78.
6. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ № 20 Федерального агентства по рыболовству от 18 января 2010 г. // Рос. газета. 5 марта 2010 г.
7. *Помазкина Г.В., Щербакова Т.А.* Видовой состав Bacillariophyta литоральной зоны оз. Байкал (Россия) // Альгология. 2010. Т. 20. № 4. С. 449–463.
8. РД 52.18.595-96. Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды. М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1996. 52 с.
9. РД 52.24.564-96. Метод оценки загрязненности пресноводных экосистем по показателям развития фитопланктонных сообществ Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: Гидрометеиздат, 1996. 23 с.
10. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.
11. *Сладечек В.* Общая биологическая схема качества воды // Санитарная и техническая гидробиология: Матер. I съезда Всес. гидробиол. о-ва. М.: Наука, 1967. С. 26–31.
12. Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. 3: Методы биологического анализа вод. М.: СЭВ, 1984. С. 69–102.
13. Численность населения Приморского края. Владивосток: Приморскстат, 2011. 33 с.
14. *Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Перепелятников Л.В.* Пространственно-временная изменчивость химического состава речных вод юга Дальнего Востока РФ // Вод. ресурсы. 2009. № 4. С. 428–439.
15. *Шулькин В.М., Семькина Г.И.* Оценка влияния поступления загрязняющих веществ с суши на экологические проблемы залива Петра Великого // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря. Владивосток: Изд. дом Дальневост. фед. ун-та, 2012. С. 252–287.
16. *Barinova S.S., Anisimova O.V., Nevo E. et al.* Diversity and ecology of algae from the Nahal Qishon river, northern Israel // Plant Biosyst. 2004. V. 138. № 3. P. 245–259.
17. *Barinova S.S., Medvedeva L.A., Nevo E.* Regional influences on algal biodiversity in two polluted rivers of Eurasia (Rudnaya River, Russia, and Qishon River, Israel) by bioindication and Canonical Correspondence Analysis (CCA) // Appl. ecol. and environ. res. 2008. V. 6. № 4. P. 29–59.
18. *Besse-Lototskaya A.* Uncertainty in diatom assessment: Sampling, identification and counting variation // Hydrobiologia. 2006. № 566. P. 247–260.
19. *Blanco S., Cejudo-Figueiras C., Tudesque L. et al.* Are diatom diversity indices reliable monitoring metrics? // Hydrobiologia. 2012. № 695. P. 199–206.
20. *Bukhtiyarova L.N.* Diatoms of Ukraine. Inland waters. Kiev: Nat. Acad. Sci. Ukraine, Inst. Botan., 1999. 133 p.
21. *Chetelat J., Pick F.R., Morin A., Hamilton P.B.* Periphyton biomass and community composition in rivers of different nutrient status // Can. J. Fish. and Aquat. Sci. 1999. V. 56. P. 560–569.
22. *Kolkwitz R., Marsson M.* Ökologie der pflanzlichen Saprobien // Ber. Dtsch. bot. Ges. 1908. Bd 26. S. 505–519.
23. *Lavoie I., Hamilton P.B., Wang Y.K. et al.* A comparison of stream bioassessment in Québec (Canada) using six European and North American diatom-based indices // Nova Hedwigia. 2009. V. 135. P. 37–56.
24. *Li S., Gu S., Liu W. et al.* Water quality in relation to land use and land cover in the upper Han River Basin, China // Catena. 2008. V. 75. P. 216–222.
25. *Marvan P., Marálek B., Heteša J. et al.* Comments on the revised tables of algal (and other botanical) water quality indicators listed in ČSN 75 7716 – discussion material for assessment of trophic status of water bodies. 2005. <http://www.cyanobacteria.net>
26. *Nikulina T.V.* Diatom flora of fresh and brackish water bodies of the Sakhalin Island (Far East, Russia) // Dia-

- toms diversity and distribution, role in biotechnology and environmental impacts. N.Y.: Nova Sci. Publ., 2013. P. 35–86.
27. *Pantle F., Buck H.* Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse // Gas- und Wasserfach. 1955. Bd 96. № 18. 604 S.
28. *Rimet F.* Recent views on river pollution and diatoms // *Hydrobiologia*. 2012. № 683. P. 1–24.
29. *Shannon C.B., Weaver W.* The mathematical theory of communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1963. 345 p.
30. *Sládeček V.* System of water quality from the biological point of view // *Arch. Hydrobiol. Ergebn. Limnol.* 1973. V. 7. P. 1–218.
31. *Sládeček V.* Diatoms as indicators of organic pollution // *Hydrochim., hydrobiol.* 1986. V. 14. № 5. P. 555–566.
32. *Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J.* A coded checklist and ecological indicators values of freshwater diatoms from the Netherlands // *Netherlands J. aquat. ecol.* 1994. V. 28. № 1. P. 117–133.

Water Quality Assessment by Chemical Characteristics and Composition of Algal Periphyton in Rivers and Streams of Primorskii Krai, Russia

V. M. Shulkin*, T. V. Nikulina**

**Pacific Geographical Institute, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch,
690041 Vladivostok, ul. Radio, 7, Russia*

***Institute of Biology and Soil Science, FEB RAS, 690022 Vladivostok, Pr. 100-letiya Vladivostoka, 159, Russia*

The water chemical composition and characteristics of the algal periphyton were studied in 25 rivers and streams with different levels of anthropogenic load within Primorskii krai, Russia. COD and ammoniac dissolved nitrogen are the most unambiguous indicators of the total anthropogenic impact. Organic dissolved phosphorus and nitrates can also be used as indicators of human-caused eutrophication in the Razdolnaya River, characterized by the highest level of eutrophication. The number and biomass of periphyton algae are quite variable even within similar streams. The species composition and saprobity index (S) calculated from it are more stable. The saprobity indexes shows less spatial variability than chemical composition of the river water. Nevertheless, the correlation between the saprobity index and concentrations of ammonia forms of nitrogen is observed, as well as between the trend in saprobity index of the Razdolnaya River for the last 20 years and dynamics of pollutants received by the river.

Keywords: chemical composition of river waters, nutrients, water quality, algae of periphyton, saprobity index