

БИОЛОГИЯ

УДК 582.26 (571.61)

СОСТАВ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ЛЕДОВЫХ ВЗВЕСЯХ СРЕДНЕГО АМУРА

А.С. Стенина¹, С.И. Генкал², В.П. Шестеркин³,
В.И. Ким³, В.О. Крутикова^{3,4}, Г.В. Харитонов³

¹ Институт биологии Коми НЦ УРО РАН,
ул. Коммунистическая 28, г. Сыктывкар, 167982,
e-mail: stenina@ib.komisc.ru;

² Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
Ярославская обл., пос. Борок, 152742,
e-mail: genkal@ibiw.yaroslavl.ru;

³ Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
ул. Дикопольцева 56, г. Хабаровск, 680000,
e-mail: shesterkin@iver.as.khb.ru, kim@iver.as.khb.ru, gkharitonova@mail.ru;

⁴ Институт тектоники и геофизики ДВО РАН,
ул. Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000,
e-mail: nm32697@gmail.ru

Представлены первые данные о составе диатомовых водорослей в шуговых взвесах р. Амур, исследованных в зимний период. Найдено 14 видов с разновидностями из 7 семейств, 2 вида установлены впервые для южной части Дальнего Востока. Основной агрегацией являются центрические виды, в основном из класса Coscinodiscophyceae, семейства Stephanodiscaceae и рода Stephanodiscus. По частоте встречаемости и экологии среди других диатомовых выделяется Stephanodiscus hantzschii – индикатор загрязненных вод.

Ключевые слова: ледовые взвеси, Средний Амур, диатомовые водоросли, Stephanodiscus.

Введение

Лед на водных объектах может содержать эвтрофирующие и загрязняющие вещества за счет захвата терригенного материала при льдообразовании, поступления аэрозолей атмосферных осадков и в результате эоловых процессов. Особенно много минеральных взвесей и органических веществ может содержать шуга [7]. Это совокупность ледяных частиц, представляющих собой сложную экологическую нишу из смеси водорослей подледных обрастаний, фитопланктона подледной воды, непланктонных группировок на частицах грунта, включенных в лед, и других организмов. Обычно шуга появляется перед ледоставом и во время ледохода. Для р. Амур образование шуги характерно не только при ледоставе, но и в зимний период. На некоторых участках она образуется в течение всей зимы и может накапливаться подо льдом. В протоках Хабаровского во-

дного узла до 50–60% площади поперечного сечения водного потока (от нижней кромки льда до дна) бывает заполнено шугой. На стрежне водного потока главного русла толщина слоя шуги может достигать 2 м [5].

Исследования о развитии водорослей в ледовом покрытии р. Амур немногочисленны [4, 10, 14 и др.], так как начались относительно недавно. Они в основном посвящены криоперифитону на нижней поверхности льда, в его толще и подледному фитопланктону. Сведения о водорослях ледовых взвесей (шуги) р. Амур нам неизвестны. Цель настоящей работы – определить ведущие виды диатомовых водорослей в ледовых взвесах Среднего Амура. Исследование этой группы организмов вследствие их индикационных свойств имеет большое значение для выявления состояния экосистем, их естественных и антропогенных изменений.

Объекты и методы исследования

Материалом для изучения послужили пробы воды с ледяной взвесью, отобранные на р. Амур в январе 2017 г. у г. Хабаровска на створе, расположенном в 0,8 км ниже ж/д моста (рис. 1). Для отбора проб и последующего анализа были выбраны вертикали, характеризующие влияние притоков р. Амур (реки Усури, Сунгари и Зeya-Бурей): точки

1, 2 и 3 соответственно (350, 500 и 1100 м от правого берега). Пробы отбирались из пробуренной ледовым буром лунки пластмассовой емкостью в полиэтиленовые бутылки объемом 0,25 л [8].

Для анализа состава диатомовых водорослей несколько капель отобранной воды на следующий день после сбора были нанесены на столики микроскопа, высушены и напылены Pt. Изучение

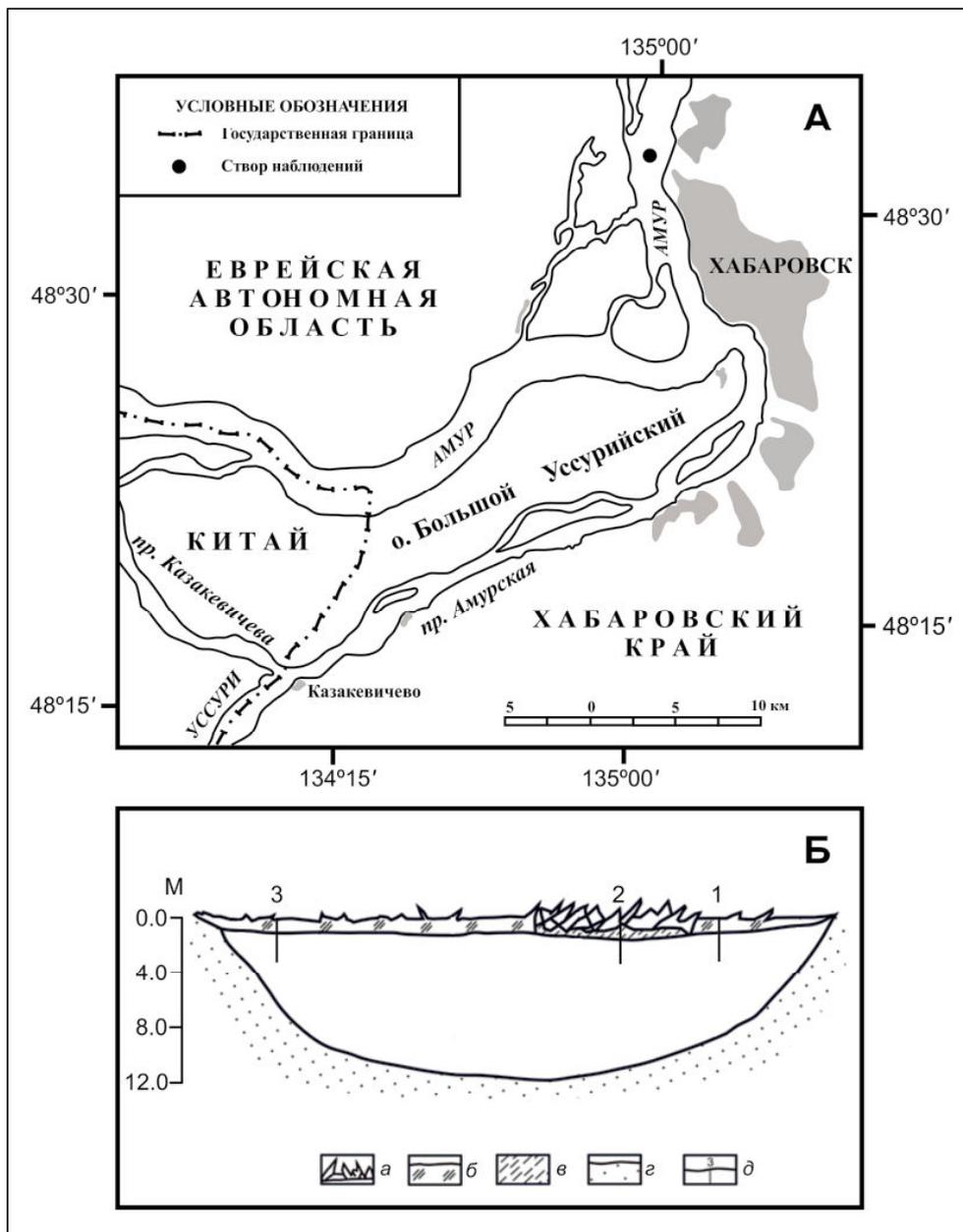


Рис. 1. Схема расположения створа (А) и точек отбора образцов (Б): а – очень торосистый лед, б – лед с одиночными торосами, в – скопление шуги подо льдом, з – песчаное дно реки, д – точки отбора

Fig. 1. Scheme of sampling site (A) and sampling points (B): а – very hummock ice, б – ice with single hummocks, в – the accumulation of ice suspensions slurries, з – sandy bottom River, д – sampling points

препаратов проведено на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMH (TESCAN, Чешская Республика), для съемки применен детектор вторичных электронов (SE-детектор). Для анализа элементного состава наиболее репрезентативных участков использовали энергодисперсионный спектрометр X-max 80 (Oxford Instruments, Великобритания). Для идентификации диатомей были использованы основные определители, систематические сводки и отдельные публикации [2, 3, 18 и др.]. Современные номенклатурные изменения уточнены по AlgaeBase [17]. Эколого-географические характеристики приведены по литературным данным [1, 19].

Аналитические работы осуществлялись по принятым в гидрохимических исследованиях методам. Гранулометрический состав образцов был проведен на анализаторе размера частиц SALD-2300 (SHIMADZU, Япония). Исследуемые образцы для гомогенизации перед анализом в течение 10 с обрабатывали встроенным ультразвуковым диспергатором.

Результаты и обсуждение

Развитие диатомовых водорослей тесно связано с физико-химическими особенностями водной среды, особенно с pH, минерализацией и содержанием легко окисляемых органических веществ. Многолетними наблюдениями установлена значительная неоднородность состава амурской воды на обследованном участке, что обусловлено влиянием его основных притоков – р. Усури (правобережная часть створа), р. Сунгари (центральная часть) и рек Зeya и Бурея (левобережная часть) [12, 13]. Воды основных притоков Амура характеризуются большими различиями в содержании солей. Максимальной концентрацией главных ионов выделяются воды р. Сунгари. Существенно меньше, в 3–4 раза, содержится этих веществ в ультрапресных водах pp. Зeya и Бурея. Поэтому у Хабаровска по ширине Амура минерализация воды и содержание в ней растворенных веществ распределены очень неравномерно, что наблюдается в течение ледостава [12]. Это связано с тем, что горизонтальное перемешивание в реках происходит медленнее вертикального [18]. Так, в зимнюю межень протока Казакевича на отдельных участках перемерзает, в результате чего химический состав воды протоки Амурская и воды в районе Хабаровска (правобережная часть) определяется составом воды р. Усури. Максимальной минерализацией и концентрацией главных ионов выделяется центральная часть (табл.), причем различия между ней и правобережной частью мало

Таблица

Table

Химический состав воды р. Амур у г. Хабаровска, мг/дм³

Chemical composition of the water of the Amur River near Khabarovsk town, mg/dm³

Часть русла	pH	С	ПО	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	М	Fe _p	Fe _{вал}	HPO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
Правобережная, точка 1	6,97	17	4,1	7,0	1,2	14,1	4,8	61	3,8	9,9	104,1	0,11	0,69	0,019	0,25	1,94
Центральная, точка 2	7,25	28	10,9	10	1,5	17,3	3,8	63	6,2	14,5	120,8	0,10	1,38	0,062	0,38	3,97
Левобережная, точка 3	6,80	56	12,6	3,0	0,9	9,4	1,4	32	1,1	3,5	52,4	0,23	0,33	0,022	0,08	0,75

Примечание: С – цветность, градус; ПО – перманганатная окисляемость, мгО/дм³; М – минерализация

выражены. Содержание общего железа, необходимого элемента жизненного цикла диатомовых водорослей, превышает таковое в право- и левобережных частях русла в 2–4 раза. Обратная картина отмечается для органического вещества (повышенная цветность) и растворенного железа, что связано с заболоченностью левобережья. Кроме того, в воде центральной части русла выше содержание биогенных веществ, хлорид- и сульфат-ионов, катионов натрия преимущественно антропогенного генезиса. В левобережной части реки

минерализация в 2,3 раза ниже. Это связано с тем, что ледяной покров существенно ослабляет поперечное перемешивание потоков, интенсивность которого зимой в 6 раз меньше, чем летом [15].

Содержание взвешенных частиц в воде правобережной и левобережной частей створа (точки 1 и 3), согласно данным электронной микроскопии и лазерной дифрактометрии (рис. 2), не превышает точности гранулометрического анализа. Минеральная часть представлена главным образом аморфным кремнеземом (рис. 2а) и солями

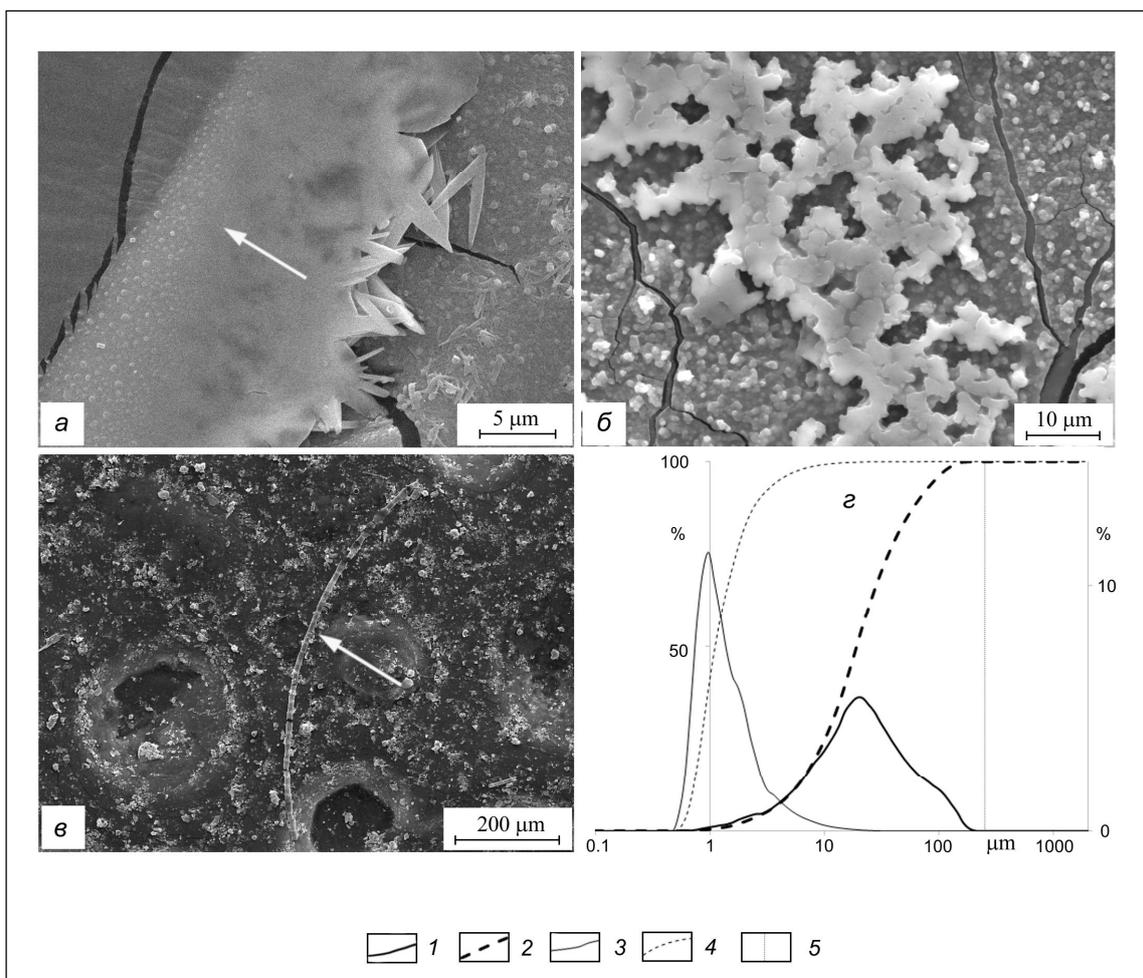


Рис. 2. Микрофотографии образцов ледовых взвесей р. Амур (а–в) и распределение частиц в них (д): т. 1, край высушенного образца, стрелка – аморфный кремнезем (а) и его центральная часть, выделения совместной кристаллизации солей (б); в – т. 2, стрелка – диатомея *Aulacoseira islandica* (РЭМ, SE-детектор); 1, 2 – распределение частиц по объему (дифференциальное и интегральное соответственно); 3, 4 – аналогичное распределение по числу частиц, 5 – граница размеров микроагрегатов, т. 2 (д). Остальные пояснения в тексте

Fig. 2. Microphotographs of the ice suspension samples of the Amur River (a–в) and particle-size distribution in it (д): point 1, edge of the dried sample, arrow – amorphous silica (a) and joint crystallization of salts (б); в – point 2, arrow – *Aulacoseira islandica*; 1, 2 – volume particle-size distribution (differential and cumulative curves); 3, 4 – number particle-size distribution, 5 – upper bound on the microaggregate size, point 2 (д). The rest of explanation is in the text

кальция и натрия (рис. 2б), осаждение которых при высушивании происходит в порядке, обратном их растворимости; диатомовые водоросли встречаются единично. Наибольшее количество как взвесей (~140 мг/дм³, мембранный фильтр 0,45 мкм), так и диатомовых водорослей (рис. 2в) встречается в воде центральной части створа (точка 2). По объему наиболее представительной является фракция крупной пыли (10–50 мкм), по числу частиц – илистая фракция (<2 мкм). Следует отметить, что зимой, как и в летний период [11], перенос тонких фракций происходит преимущественно в составе микроагрегатов: размер переносимых частиц не превышает 250 мкм (рис. 2г).

Всего на обследованных участках реки в пробах ледовых взвесей найдено 19 диатомовых водорослей, из них 14 определены до вида и 5 – до рода. Они относятся к 7 семействам (*Stephanodiscaceae*, *Aulacoseiraceae*, *Fragilariaceae*, *Naviculaceae*, *Cymbellaceae*, *Eunotiaceae*, *Rhopalodiaceae*) и 7 соответствующим порядкам. Основное разнообразие приходится на центрические диатомеи из 2 родов: *Stephanodiscus* и *Aulacoseira*. Чаще других встречается *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, ему сопутствуют *S. invisitatus* Hohn et Hellermann, *S. makarovae* Genkal, *S. minutulus* (Kützing) Cleve et Möller. В состав диатомового комплекса входят также *Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen (найдена с ауксоспорами) и *A. subarctica* (O. Müller) Haworth (рис. 3). Их дополняют представители рода *Cyclotella*: *Cyclotella scaldensis* Muylaert et Sabbe, *C. meduanae* Germain и рода *Cyclostephanos* – *Cyclostephanos dubius* (Fricke) Round. Пеннатные диатомеи представлены немногочисленными бесшовными видами – *Meridion circulare* (Gréville) Agardh var. *circulare* et var. *constrictum* (Ralfs) Van Heurck и *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère. В числе шовных диатомовых отмечены единичные *Eunotia soleirolii* (Kützing) Rabenhorst, *Geissleria similis* (Krasske) Lange-Bertalot et Metzeltin, а также *Cymbella* sp., *Navicula* spp., *Rhopalodia* sp. (рис. 4). Новыми для южной части Дальнего Востока [6] являются 2 вида: *Cyclotella scaldensis* и *Geissleria similis*. Основная часть видового состава – космополиты, лишь виды рода *Aulacoseira* – холоднолюбивые, арктоальпийские.

Большей частью выявленные диатомовые – планктонные виды, на втором месте обитатели нескольких экологических группировок. По глобности это преимущественно индифференты, встречающиеся в водной среде со средней степенью солености; по отношению к pH – алкалифилы и алкалибионты, предпочитающие слабо-

щелочную и щелочную среду, а также наличие легко окисляемых органических веществ [1]. Выделяется по частоте встречаемости и экологии *Stephanodiscus hantzschii* – галофил, алкалибионт, альфамезо-полисапроб, обитатель эвтрофных и гиперэвтрофных вод. Все его характеристики позволяют рассматривать этот вид как биоиндикатор в значительной степени загрязненных вод. Такое развитие этого вида в криоперифитоне и подледном фитопланктоне ранее не отмечалось [14]. Была зарегистрирована одновидовая популяция *Melosira islandica* (*Aulacoseira islandica*) вследствие ее массового развития и скопления во льду с образованием до 96% биомассы и более, что позволяло оценивать этот вид как «абсолютного доминанта» [10]. Хотя в отдельные зимние периоды центрические диатомеи из родов *Stephanodiscus* и *Cyclotella* (без указания видовой принадлежности) участвовали в формировании подледного фитопланктона, достигая 44% биомассы. Изменение состава ведущих видов связано, возможно, с загрязнением вод р. Амур поступлением поллютантов из ее основного притока – реки Сунгари. Повышенная минерализация воды и более высокая концентрация хлоридов, сульфатов и соединений биогенных элементов (фосфора, азота, железа) стимулируют развитие *Stephanodiscus hantzschii*, первого по частоте встречаемости в центральной части русла, и подтверждают его биоиндикационные свойства. Массовое развитие этого вида и иных представителей рода *Stephanodiscus* выявлено и в других реках (Иртыш, Енисей, Волга, Дунай и т.д.), испытывающих антропогенное эвтрофирование и загрязнение [9 и др.]. О загрязненности водной среды Среднего Амура может свидетельствовать и аномалия створки *Meridion circulare* var. *constrictum* (рис. 4), которую связывают с наличием в воде пестицидов [16].

Заключение

В результате исследований установлена неоднородность физико-химических свойств водной среды и компонентов шуги на разных участках р. Амур в зимний период. Максимальной минерализацией воды, содержанием минеральных взвесей и частой встречаемостью диатомовых водорослей выделяется центральная часть русла, что обусловлено влиянием р. Сунгари. Наибольшие различия отмечаются в содержании хлоридного, сульфатного, аммонийного, нитратного ионов, ионов натрия преимущественно антропогенного генезиса. В ледовых взвесах р. Амур найдено 14 видов диатомовых водорослей из 7 семейств с преобладанием *Stephanodiscus hantzschii*, разви-

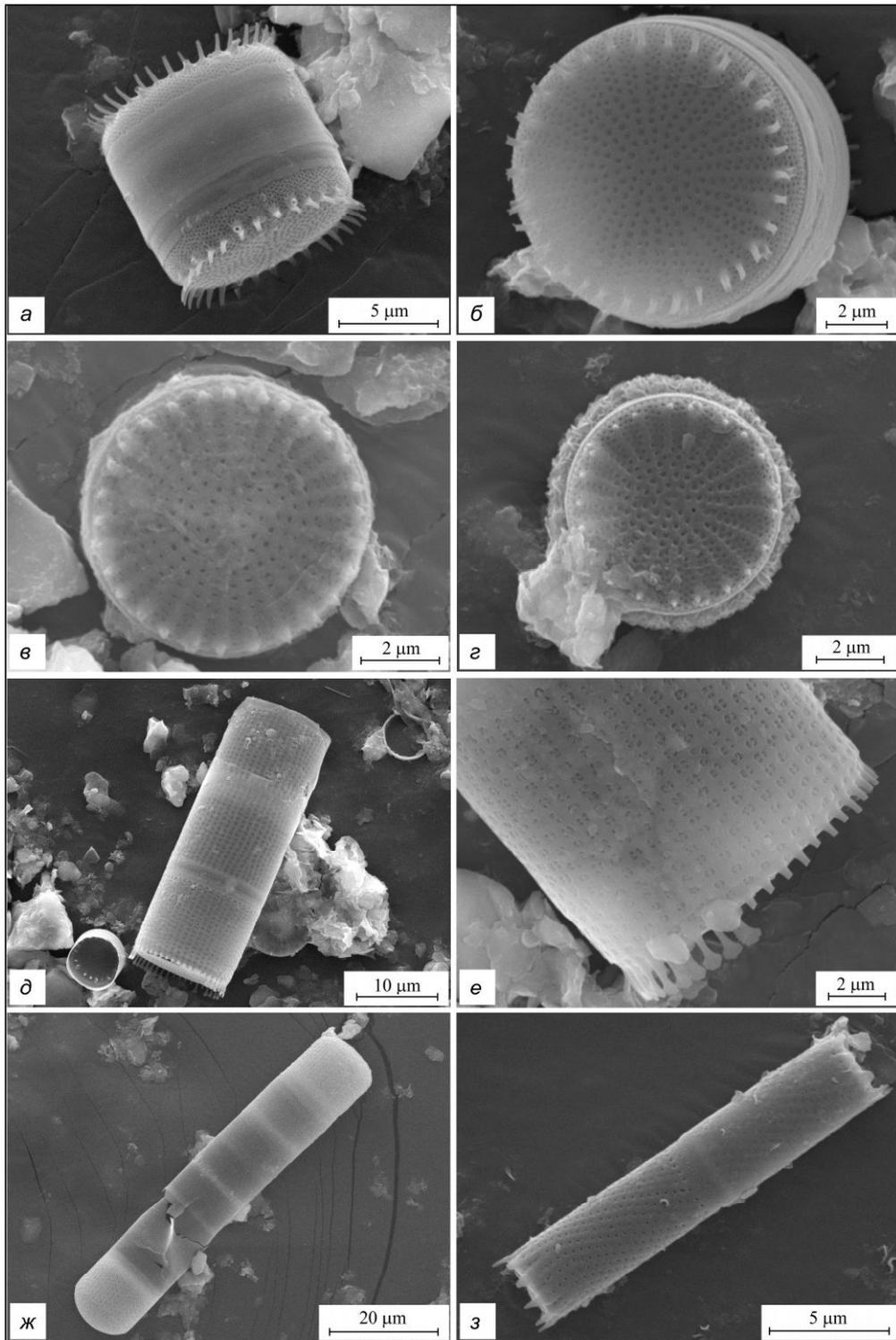


Рис. 3. Центрические диатомовые роды *Stephanodiscus* и *Aulacoseira* в ледовых взвесьях р. Амур:
a, б – *S. hantzchii* Grunow; *в* – *S. minutulus* (Kützing) Cleve et Möller; *г* – *S. makarova* Genkal; *д–ж* –
A. islandica (O. Müller) Simonsen; *з* – *A. subarctica* (Müller) Haworth (РЭМ, SE-детектор).
 Остальные пояснения в тексте

Fig. 3. Centric diatoms of genera *Stephanodiscus* and *Aulacoseira* in the ice suspensions of the Amur River:
a, б – *S. hantzchii* Grunow; *в* – *S. minutulus* (Kützing) Cleve et Möller; *г* – *S. makarova* Genkal;
д–ж – *A. islandica* (O. Müller) Simonsen; *з* – *A. subarctica* (Müller) Haworth.
 The rest of explanation is in the text

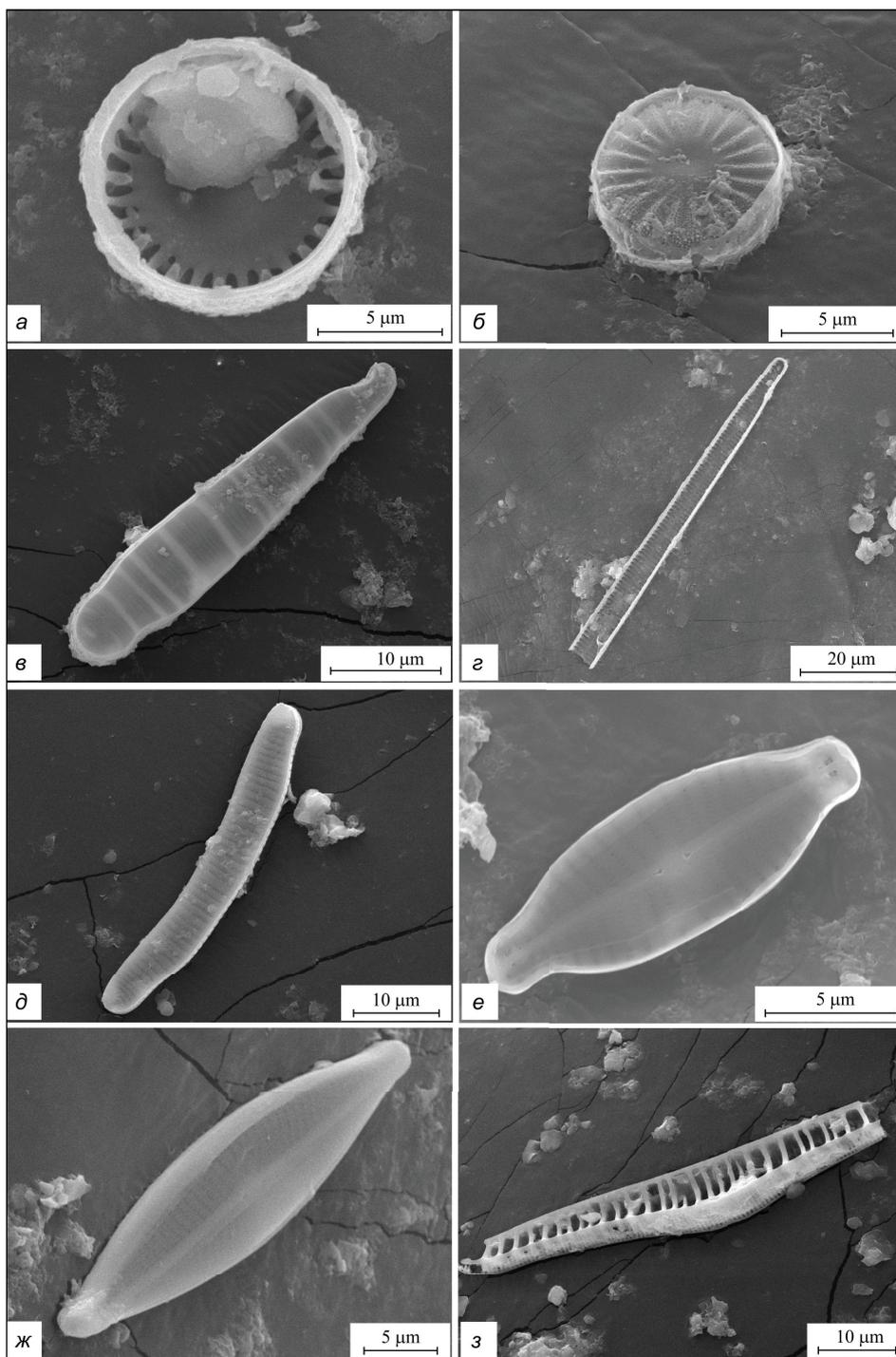


Рис. 4. Центрические диатомовые рода *Cyclotella* (а, б), пеннатные бесшовные виды (в, г) и шовные виды диатомовых (д–з) в ледовых взвесах р. Амур: а – *Cyclotella scaldensis* Muylaert et Sabbe; б – *C. meduanae* Germain; в – *Meridion circulare* (Gréville) Agardh var. *constrictum* (Ralfs) Van Heurck; г – *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère; д – *Eunotia soleirolii* (Kützing) Rabenhorst; е – *Geissleria similis* (Krasske) Lange-Bertalot et Metzeltin; ж – *Navicula* sp., з – *Rhopalodia* sp.
Остальные пояснения в тексте

Fig. 4. Centric diatoms of genus *Cyclotella* (a, б), Pennate seamless species (в, г) and diatoms with seam (д–з) in the ice suspensions of the Amur River: а – *Cyclotella scaldensis* Muylaert et Sabbe; б – *C. meduanae* Germain; в – *Meridion circulare* var. *constrictum* (Ralfs) Van Heurck; г – *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère; д – *Eunotia soleirolii* (Kützing) Rabenhorst; е – *Geissleria similis* (Krasske) Lange-Bertalot et Metzeltin; ж – *Navicula* sp., з – *Rhopalodia* sp. The rest of explanation is in the text

тие которого связано с повышением концентрации главных ионов и соединений биогенных элементов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.
2. Генкал С.И., Чекрыжева Т.А., Комулайнен С.Ф. Диатомовые водоросли водоемов и водотоков Карелии. М.: Научный мир, 2015. 202 с.
3. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные) Т. II, вып. 2 / отв. ред. И.В. Макарова. СПб.: Наука, 1992. 125 с.
4. Лебедев Ю.М., Юрьев Д.Н., Сиротский С.Е. Зимний фотосинтез в р. Амур и развитие водорослей в связи с подледными световыми условиями // Круговорот вещества и энергии в водоемах. Вып. 1. Элементы биотического круговорота. Иркутск: СО АН СССР, 1981. С. 88–89.
5. Махинов А.Н., Ким В.И., Шмигирилов С.А. Строение льда и ледового покрова реки Амур в нижнем течении на участках разветвленного русла // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 4. С. 1–10.
6. Медведева Л.А., Никулина Т.В. Каталог пресноводных водорослей юга Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2014. 271 с.
7. Немировская И.А., Кравчишина М.Д., Реджепова З.Ю. Органические соединения и взвесь в снежно-ледяном покрове и почвах в районах антарктических станций России // Лёд и снег. 2015. Т. 55, № 4. С. 114–126.
8. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 550 с.
9. Сокольский А.Ф., Евсеева С.С. Фитопланктон Нижней Волги и других рек Европы при антропогенном воздействии // Водные биоресурсы и их рациональное использование. Вестник Астраханского государственного техн. ун-та. 2011. № 2. С. 49–52.
10. Усольцева М.В., Никулина Т.В., Юрьев Д.Н., Лихошвай Е.В. К изучению развития и морфологических особенностей *Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen (Bacillariophyta) // Альгология. 2006. Т. 16, № 2. С. 145–155.
11. Шалдыбин М.В., Харитонов Г.В., Ким В.И., Лопушняк Ю.М., Уткина Е.В., Дембовецкий А.В., Коновалова Н.С., Юдина А.В., Шмигирилов С.А. Минералогия и состав отложений реки Амур в зоне влияния реки Сунгари // Тихоокеанская геология. 2016. № 1. С. 92–108.
12. Шестеркин В.П. Изменение химического состава речных вод в Хабаровском водном узле за столетие // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29, № 2. С. 112–118.
13. Шестеркин В.П. Сезонная и пространственная изменчивость химического состава вод Верхнего Амура // Региональные проблемы. 2016. Т. 19, № 2. С. 35–42.
14. Юрьев Д.Н., Лебедев Ю.М. Развитие ледового перифитона р. Амур в связи со световым фактором // Ботанический журнал. 1988. Т. 73, № 11. С. 1546–1551.
15. Engmann J.E., Kellerhals R. Transverse mixing in an ice-covered river // Water Resour. Res. 1974. Vol. 10, N 4. P. 775–784.
16. Falasco E., Bona F., Badino G., Hoffmann L., Ector L. Diatom teratological forms and environmental alterations: a review // Hydrobiologia. 2009. Vol. 623. P. 1–35.
17. Guiry, M.D., Guiry, G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland. Galway. 2017. URL: <http://www.algaebase.org>; searched on 15 May 2017 (дата обращения: 02.07.2017).
18. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Teil 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. 1991. Bd. 2/3. 576 p.
19. Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands // Neth. J. Aquat. Ecol. 1994. Vol. 1, N 28. P. 117–133.

DIATOM COMPOSITION IN THE ICE SUSPENSIONS OF THE MID-AMUR

A.S. Stenina, S.I. Genkal, V.P. Shesterkin, V.I. Kim, V.O. Krutikova, G.V. Kharitonova

The first data on diatom composition in the ice suspensions of the Amur River in winter are presented. 14 species with varieties from 7 families are found, 2 species of them being recorded for the first time in the south part of the Far East. The basis of aggregations is the centric species, especially from the class Coscinodiscophyceae, family Stephanodiscaceae and genus Stephanodiscus. Stephanodiscus hantzschii as the indicator of polluted waters stands out among others diatoms by frequency of occurrence and ecology.

Keywords: ice suspensions, the Mid-Amur, diatoms, *Stephanodiscus*.