

УДК 561.26(265.3)

ДИАТОМОВЫЕ ВОДОРОСЛИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКОВ ЗАЛИВА АКАДЕМИИ ОХОТСКОГО МОРЯ

© 2023 г. И. Б. Цой¹, *, И. А. Прушковская¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток 690041, Россия

*e-mail: tsoy@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 26.05.22 г.

После доработки 01.11.22 г.

Принята к публикации 24.11.22 г.

Представлены результаты изучения диатомовых водорослей в поверхностных осадках зал. Академии (Охотское море). Обнаружена богатая диатомовая флора (187 видов и внутривидовых таксонов), представленная преимущественно морскими и солоноватоводными видами. Преобладание бенто-планктонных и бентосных видов указывает на значительную роль микрофитобентоса в зал. Академии. Выделенные с помощью кластерного анализа диатомовые комплексы однородны по таксономическому составу, но различаются экологической структурой, которая в основном определяется соленостью вод. Концентрация диатомей в осадках открытой части зал. Академии и кутовой части Ульбанского залива обусловлена высокой продуктивностью вод и литологическим составом осадков. Относительно низкое содержание диатомей в осадках связано с суровыми климатическими условиями региона, близкими к арктическим.

Ключевые слова: диатомовые водоросли, поверхностные осадки, микрофитобентос, залив Академии, Шантарский район

DOI: 10.31857/S0134347523020092, **EDN:** DVXТАН

Эстуарные акватории дальневосточных морей нельзя оценить без изучения диатомовых водорослей, которые являются важным компонентом фитопланктона и микрофитобентоса как речных, так и морских экосистем. Микрофитобентосные сообщества – это кормовая база для бентосных животных. Продуктивность микрофитобентоса в прибрежных районах умеренных и тропических широт сопоставима с продуктивностью фитопланктона, а иногда даже превышает ее (Varganuet et al., 1997; Karsten et al., 2012). Микрофитобентос стабилизирует поверхностный слой осадков и защищает его от эрозии, влияя на обмен кислорода и питательных веществ через систему осадок–вода (Hendey, 1964). Несмотря на важную экологическую роль, диатомовые водоросли микрофитобентоса эстуарных районов прибрежных акваторий дальневосточных морей до сих пор мало изучены (Обрезкова, 2009; Цой, Моисеенко, 2014; Бегун, Рябушко, 2020). Данные по изучению диатомовых водорослей в зал. Академии практически отсутствуют. Изученные ранее диатомеи из верхнеплейстоцен–голоценовых отложений зал. Николая и прибрежной равнины Усалгинской депрессии, расположенных юго-восточнее зал. Академии, характеризуются преобладанием морских видов (Пушкарь, 1979). Диато-

мывые водоросли из торфяников о-ва Большой Шантар, использованные для изучения развития природной среды в самой холодной части Охотского моря, были представлены преимущественно пресноводными видами (Разжигаева и др., 2021). Морские диатомеи, обнаруженные в торфяниках, попадали туда во время экстремальных штормов, регистрируя прохождение морских циклонов в осенне-зимний период (Razjigaeva et al., 2022). Известны также немногочисленные данные по диатомеям фитопланктона и поверхностных осадков Сахалинского залива, расположенного восточнее зал. Академии (Киселев, 1931; Смирнова, 1959; Жузе, 1962; Орлова и др., 2004). В поверхностных осадках открытой части этого залива преобладали морские виды (Жузе, 1962; Обрезкова, 2009); в южной части, у входа в Амурский лиман, доминировали представители пресноводного рода *Aulacoseira* (Обрезкова, 2009).

Цели настоящей работы – изучение видового состава и экологической структуры диатомовых комплексов в поверхностных осадках зал. Академии и его внутренних заливов, а также оценка роли диатомовых водорослей в осадках данного района.

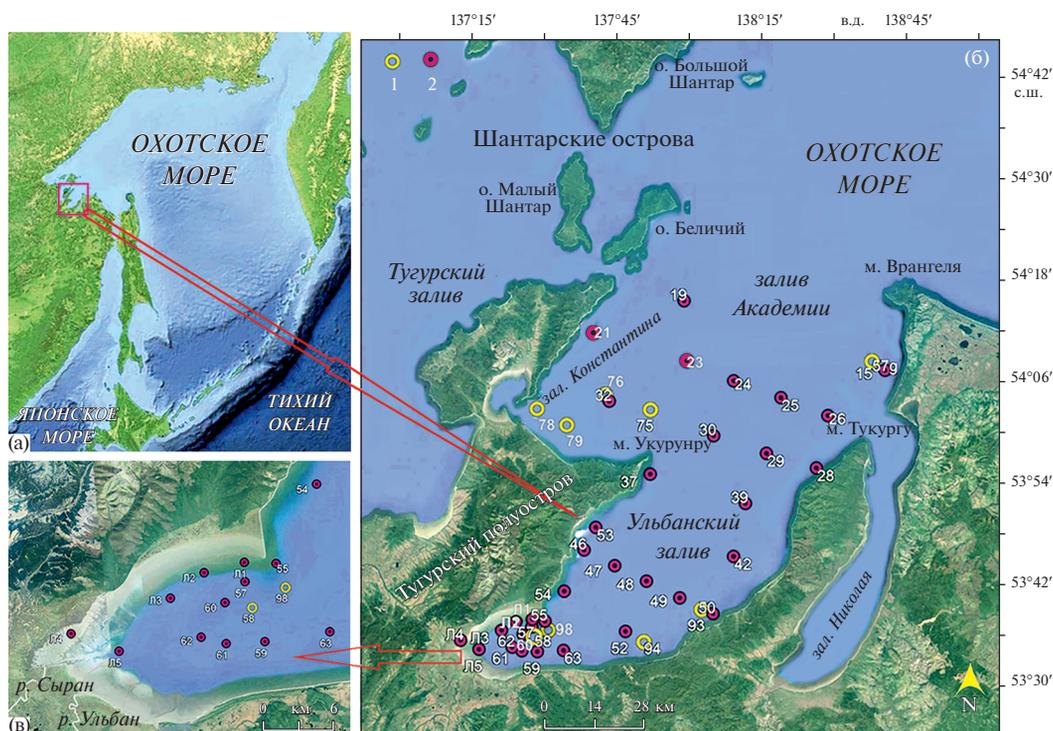


Рис. 1. Карта-схема района исследования (а) и расположение изученных станций в зал. Академии (б) и кутовой части Ульбанского залива (в). 1 – станции 71-го рейса НИС “Профессор Гагаринский”, 2 – 59-го рейса НИС “Академик Опарин”.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Характеристика района исследования

Зал. Академии располагается в северо-западной части Охотского моря (рис. 1). Он разделяется на глубоко врезающиеся в материк внутренние заливы Константина, Николая и Ульбанский залив. Зал. Академии и его внутренние заливы мелководны, глубины на входе в залив не превышают 52 м, в средней части составляют 30–35 м и уменьшаются к берегам (Тищенко и др., 2022). Образование заливов и отделение островов Шантарского архипелага от континента произошло, вероятно, в четвертичный период (Кулаков, 1980).

Зал. Академии находится в районе Охотско-Шантарского осадочного бассейна, представленного преимущественно палеогеновыми и неогеновыми отложениями (Варнаровский и др., 2002). Берега имеют специфические черты, обусловленные продолжительным ледоставом, который ограничивает волновое воздействие на побережье залива (Гидрометеорология ..., 1998). Аккумулятивные берега (лагунные, ваттовые) представлены в вершинах заливов и бухт, вдающихся в равнинные участки побережья (Леонова, Белоус, 2021). Современные осадки зал. Академии и Ульбанского залива – терригенные, представлены преимущественно алевритами и мелкозернистыми песками с включениями гальки разного размера; в зал. Константина преобладают крупная и

средняя галька (Астахов, 1986). В Ульбанский залив впадает несколько рек, самые крупные из которых р. Сыран и р. Ульбан. В этом заливе относительно низкий объем водного и твердого стоков сочетается с достаточно высоким потоком фосфора в минеральной и органической формах (Семкин и др., 2022).

Климат Шантарского района Охотского моря муссонно-континентальный, с суровой зимой и относительно теплым летом, характеризуется частой сменой погоды (Петров и др., 2000; Варнаровский и др., 2002). В зал. Академии, находящемся вблизи самой холодной области Охотского моря, существуют холодные плотные шельфовые воды с температурой около -1.7°C , которые сохраняются в течение всего года (Рогачев, 2012). Здесь происходит накопление и разрушение дрейфующего льда, который присутствует в заливе с конца октября – начала ноября до июля (Гидрометеорология ..., 1998; Рогачев, Шлык, 2014).

Для зал. Академии характерны высокие приливы со сложным приливно-отливным течением. Максимальная величина приливов, превышающая 5 м, наблюдается в Ульбанском заливе (Гидрометеорология ..., 1998). Сильные суточные и полусуточные приливы приводят к увеличению потоков питательных веществ и высокой продуктивности, особенно в мелководных заливах, которые служат важным местом летнего нагула

гренландских китов (Рогачев, 2012; Мельников и др., 2020; Rogachev et al., 2008).

Сбор образцов и анализ комплексов диатомей

С целью изучения комплекса диатомей были проанализированы 44 образца поверхностных осадков зал. Академии Шантарского района Охотского моря (рис. 1), собранные в 71-м рейсе НИС “Профессор Гагаринский” (июль–август 2016 г.) (Отчет ..., 2016; Тищенко и др., 2018) и 59-м рейсе НИС “Академик Опарин” (сентябрь 2020 г.) (Тищенко и др., 2022). Осадки в районе исследования были представлены преимущественно илами, илистыми песками, часто с галькой, иногда с гравием и ракушкой (табл. 1). Глубины отбора образцов варьировали от 2.1 м в устье р. Сыран до 42.5 м в центральной части зал. Академии. Образцы отбирали дночерпателем Ван Вина (ТОИ ДВО РАН, Россия). На ваттах – низменной прибрежной отмели приливной зоны, осушающейся во время отливов – образцы (Л1–Л6) отбирали с надувной лодки.

Для выделения диатомей из осадков использовали стандартную методику (Жузе и др., 1974), но без применения химических веществ при кипячении. Образцы обрабатывали дистиллированной водой. Для приготовления препаратов использовали высокопреломляющую среду MOUNTEX с показателем преломления 1.67 (Histolab, Гетеборг, Швеция). Изучение, подсчет и фотографирование диатомовых водорослей проводили с помощью светового микроскопа IMAGER.A1 с цифровой видеокамерой AxioCam MRc (Carl Zeiss AG, Германия) при увеличении $\times 1000$. Подсчитывали по 200–500 экз. диатомей (в зависимости от их обилия) с последующим пересчетом в процентное содержание.

По отношению к солености экологическая структура диатомовой флоры и комплексов разделялась на морские, солоноватоводные и пресноводные виды, а также эвригалинные виды, выдерживающие значительные колебания солености и обитающие как в морских, так и в пресных водах; в соответствии с местообитанием среди морских, солоноватоводных и эвригалинных видов выделяли группы бентосных, планктонных и бенто-планктонных.

Экологические характеристики водорослей и источники, использованные для идентификации диатомовых водорослей, приведены в ранее опубликованных работах (Цой, Обрезкова, 2017; Цой, Емельянова, 2021). Полные данные о таксономическом составе и количестве кремнистых микроводорослей поверхностных осадков зал. Академия представлены в табл. 2 и 3, которые размещены на сайте ТОИ ДВО РАН: <https://www.poi.dvo.ru/sites/default/files/Documents/Articles/Tables%201-3.xlsx>.

Для выявления особенностей распространения диатомовых водорослей в зал. Академии был проведен Q-кластерный анализ по объектам. Для кластерного анализа использовали образцы, полученные в 59-м рейсе НИС “Академик Опарин”. Объединение объектов было проведено по методу взвешенного попарного арифметического среднего (WPGMA – weighted pair-group method using arithmetic averages) (<http://statsoft.ru/home/text-book/modules/stcluan.html>). В качестве меры сходства/различия был выбран коэффициент корреляции Пирсона – параметр, позволяющий с определенной вероятностью судить о связи объектов. Кластерный анализ распределения диатомей в поверхностных осадках зал. Академия проводили с помощью программы STATISTICA 12 (StatSoft, США). Для кластерного анализа использовали данные по таксономическому составу кремнистых микроводорослей и их процентному содержанию в образце. Карты распределения диатомовых водорослей в поверхностных осадках строили в пакете Surfer 15 (Golden Software, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Диатомовая флора поверхностных осадков зал. Академия представлена 187 видами и внутривидовыми таксонами, принадлежащими к 83 родам, 50 семействам, 29 порядкам и 3 классам (табл. 2). Наибольшее разнообразие характерно для родов *Diploneis* (11 видов и внутривидовых таксонов), *Navicula* (11), *Tryblionella* (10), *Thalassiosira* (9), *Chaetoceros* (8), *Amphora* (6), *Pinnularia* (6), *Grammatophora* (5), *Hyalodiscus* (5) и *Nitzschia* (5). В изученных образцах обнаружено от 20 до 52 видов и внутривидовых таксонов. Диатомовые комплексы были довольно однородны и характеризовались доминированием морского и солоноватоводного бенто-планктонного вида *Paralia sulcata* (70.1%), а также видами *Actinoptychus senarius* (6.2%), *Thalassiosira simonsenii* (7.0%), *Thalassionema nitzschioides* (2.6%) и *Navicula peregrina* (2.1%). Виды *Pleurosigma angulatum*, *Odontella aurita*, *Thalassiosira antarctica* и *Trachyneis aspera* были постоянными компонентами комплексов с содержанием выше 1%. В сумме перечисленные виды в комплексах составляли 77.7–98% (табл. 3).

В диатомовой флоре по количеству видов преобладали морские (74 вида) (рис. 2а), а по численности – солоноватоводные (82.3%) (рис. 2б). Несмотря на заметное видовое разнообразие пресноводных диатомей (37 видов), их содержание в диатомовой флоре было незначительным (0.2%) из-за спорадической встречаемости, что указывает на слабое влияние речного стока. Среди морских, солоноватоводных и эвригалинных диатомей резко преобладали бенто-планктонные виды (78.1%), жизненный цикл которых проходит как

Таблица 1. Каталог изученных станций поверхностных осадков залива Академии

Станция	Широта	Долгота	Глубина, м	Тип осадков
71-й НИС “Профессор Гагаринский”, 2016 г., нач. экспедиции П.Я. Тищенко				
57g	54°09.019′	138°36.661′	30	Песок илистый, галька
75	54°03.686′	137°51.082′	23	Песок илистый, галька
76	54°05.469′	137°42.752′	20	Ил песчанистый
78	54°03.167′	137°31.561′	10	Песок илистый, галька
79	54°01.028′	137°36.087′	12.5	Ил песчанистый, галька
93	53°40.137′	138°01.987′	16.2	Песок илистый плотный
94	53°36.321′	137°50.042′	13	Песок илистый
98	53°37.705′	137°31.258′	14	Песок илистый, галька, гравий
59-й рейс НИС “Академик Опарин”, 2020 г., нач. экспедиции П.Я. Тищенко				
15	54°08.257′	138°39.406′	29.5	Ил
19	54°16.627′	137°58.823′	39.4	Ил, галька, ракуша
21	54°12.808′	137°40.568′	28.8	Ил, галька, ракуша
23	54°09.451′	137°59.350′	41.6	Ил, галька, ракуша
24	54°07.186′	138°08.791′	42.5	Ил, галька, ракуша
25	54°05.165′	138°18.316′	41.5	Ил, галька
26	54°03.005′	138°27.755′	31.1	Ил
28	53°56.861′	138°25.331′	21	Ил, галька, ракуша
29	53°58.627′	138°15.302′	37.1	Ил, галька, ракуша
30	54°00.736′	138°04.691′	35.4	Ил, галька
32	54°04.828′	137°43.642′	6.3	Ил
37	53°56.239′	137°51.894′	26.3	Ил, галька
39	53°52.756′	138°11.011′	34.1	Ил, галька
42	53°46.522′	138°08.567′	28	Ил, галька
46	53°47.311′	137°38.579′	11.4	Ил, галька
47	53°45.463′	137°44.723′	20	Илистый песок
48	53°43.642′	137°51.091′	21.8	Песок илистый, галька, ракуша
49	53°41.660′	137°57.755′	19.6	Песок илистый, галька
50	53°39.802′	138°04.385′	17.8	Песок илистый
52	53°37.720′	137°46.866′	17.7	Илистый песок, галька
53	53°49.973′	137°40.922′	21.8	Песок илистый
54	53°42.439′	137°34.600′	15.7	Ил, глина черная
55	53°38.914′	137°30.740′	14.8	Ил, галька
57	53°38.209′	137°28.112′	12.8	Ил
58	53°36.916′	137°28.448′	15.3	Ил
59	53°35.304′	137°29.225′	10.3	Ил
60	53°37.322′	137°26.360′	10.8	Ил
61	53°35.392′	137°26.128′	8.2	Ил
62	53°35.810′	137°24.186′	10.9	Песок илистый
63	52°35.456′	137°34.468′	14.7	Ил, ракуша, галька
Л1	53°39.119′	137°28.218′	3.1	Ил песчанистый
Л2	53°38.820′	137°24.929′	2.1	Ил песчанистый
Л3	53°37.782′	137°22.041′	2.1	Ил песчанистый
Л4	53°36.570′	137°13.844′	3.7	Ил песчанистый
Л5	53°35.529′	137°17.540′	2.3	Ил песчанистый
Л6	53°35.156′	137°19.761′	5.0	Ил песчанистый

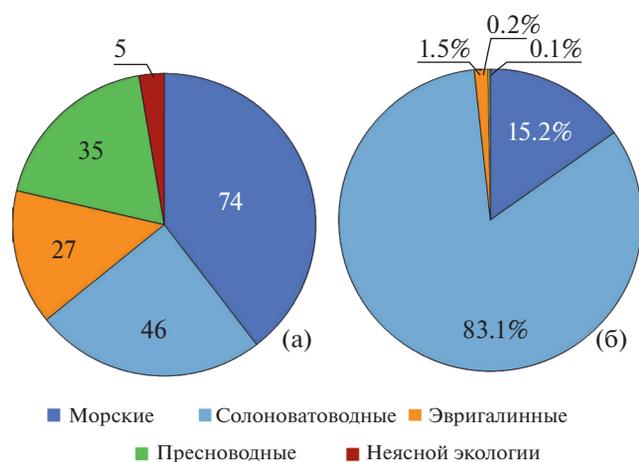


Рис. 2. Экологическая структура диатомовой флоры поверхностных осадков зал. Академии: а – количество видов, б – процентное содержание с учетом численности видов в экологических группах диатомовой флоры.

на дне, так и в водной толще. Количество планктонных диатомей составляло 15.5%, бентосных – 6.1%.

Кластерный анализ

По результатам кластерного анализа, проведенного на основе полной выборки для 166 видов диатомей, определенных в поверхностных осадках 36 станций зал. Академии, установлено, что изученные станции разделяются на кластеры А и Б. Последний, в свою очередь, подразделяется на два подкластера: Б-1 и Б-2 (рис. 3а). Географическое положение станций, объединенных в кластеры и подкластеры, представлено на рис. 3б; здесь же показано распределение вида *P. sulcata*, доминирующего в изученных осадках.

Кластер А объединяет станции зал. Академии. Для комплекса диатомей этого кластера характерно доминирование *P. sulcata* (66.1%), субдоми-

нировали *T. simonsenii* (10.5%), *A. senarius* (7.5%). Редко, но постоянно встречались *N. peregrina* (3.2%), *Thalassionema nitzschioides* (2.8%), *Trachyneis aspera* (2.2%), *O. aurita* (2.5%) и *T. antarctica* (1.3%) (рис. 4). Единично встречены характерные для комплексов кластера А криофильные виды *Fragilariopsis cylindrus*, *F. oceanica* и *F. reginae-jahniae*, а также морские планктонные виды *Bacterosira bathyomphala*, *Sundstroemia setigera*, *Coscinodiscopsis jonesiana* и представители рода *Chaetoceros* (споры). Спорадически отмечались океанические виды *Rhizosolenia hebetata* и *Actinocyclus curvatulus*.

Кластер Б включает станции заливов Академии, Константина и Ульбанского залива. Его видовой состав комплексов диатомей близок к таковому кластера А, однако количественное соотношение видов отличается; увеличиваются разнообразие и роль солоноватоводных и эвригалинных бентосных диатомей. Кластер Б подразделяется на два подкластера.

Подкластер Б-2 объединяет станции заливов Академии, Константина и Ульбанского залива. В комплексах Б-2 содержание *P. sulcata* достигало 74.4%, также возросло количество бентосного солоноватоводного вида *P. angulatum*, но уменьшилось содержание планктонных *T. simonsenii*, *T. antarctica*, *Thalassionema nitzschioides* и *O. aurita*, а также бентосных *Trachyneis aspera* и *N. peregrina*; постоянным компонентом комплексов стал *Melosira arctica*. Диатомеи, обнаруженные только в осадках станций кластера Б-2, представлены в основном бентосными видами *Cosmioneis grossepunctata*, *Cocconeis costata*, *Cocconeis pellucida*, *Diploneis suborbicularis*, *D. dydimus*, *Arachnoidiscus ehrenbergii*, *Hyalodiscus scoticus*, *Lyrella lyroides*, *Tryblionella levidensis* и *Plagiogramma stauraphorum* (рис. 5), которые встречались единично на отдельных станциях.

Подкластер Б-1 объединяет станции Ульбанского залива, расположенные преимущественно в его кутовой части. Для комплексов диатомей Б-1 характерно максимальное содержание *P. sulcata*

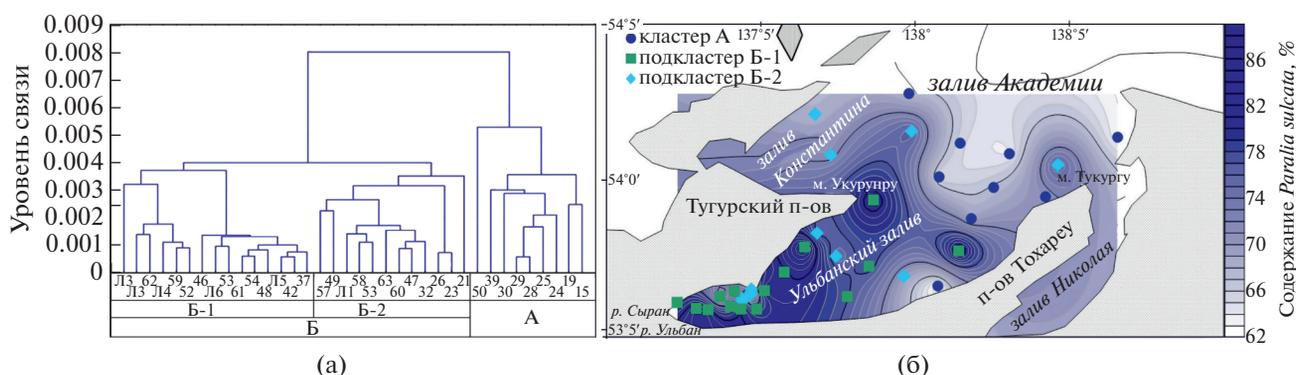


Рис. 3. Дендрограмма распределения диатомовых водорослей (а); процентное содержание доминирующего вида *Paralia sulcata* в поверхностных осадках зал. Академии и географическое положение станций, объединенных в кластеры и подкластеры (б).

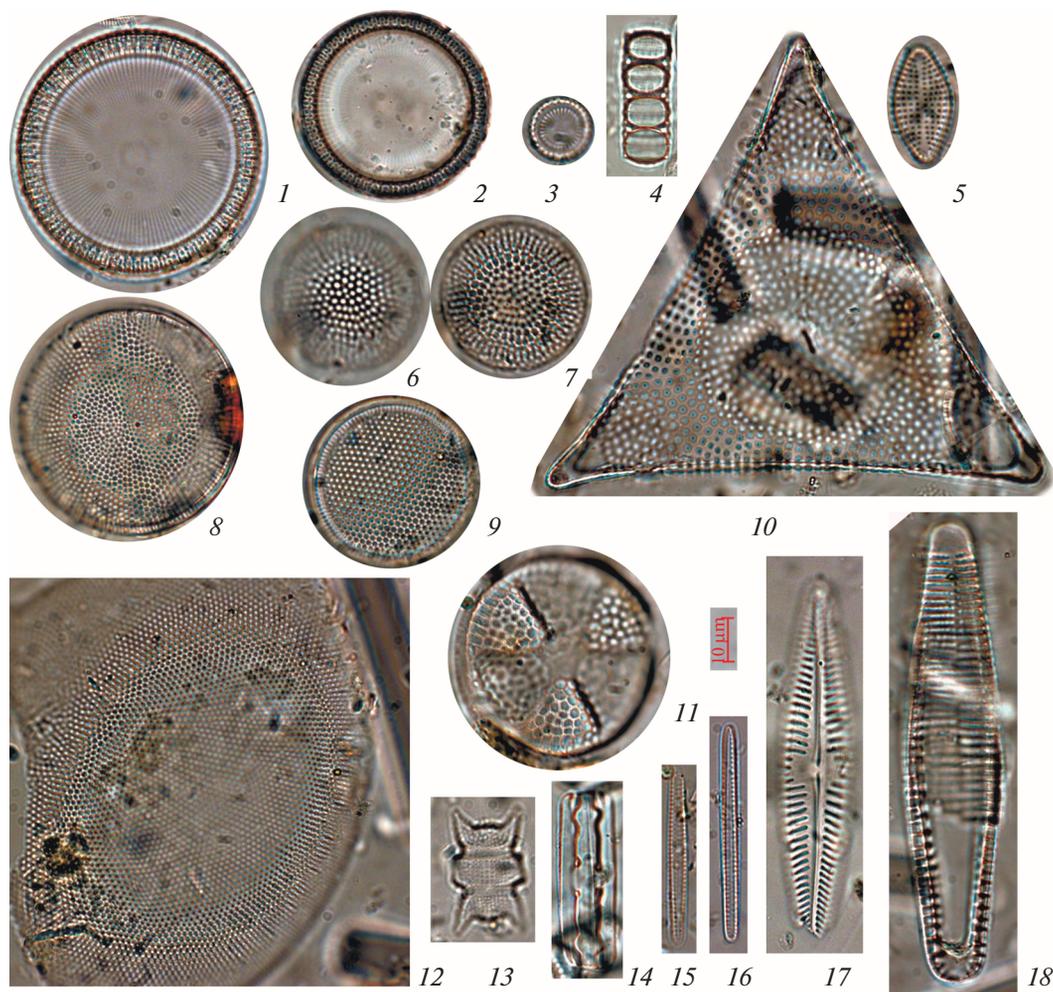


Рис. 4. Диатомеи из поверхностных осадков зал. Академии (кластер А): *Paralia sulcata* (1–4), *Delphineis surirella* (5), *Thalassiosira antarctica* (6, 7), *T. hyperborea* (8), *T. simonsenii* (9), *Lithodesmium* sp. (10), *Actinocyclus senarius* (11), *Coscinodiscopsis jonesiana* (12), *Odontella aurita* (13), *Grammatophora marina* (14), *Thalassionema nitzschioides* (15, 16), *Navicula peregrina* (17) и *Rhabdonema arcuatum* (18). Образцы 1, 5, 13, 15 и 16 собраны на станции 30; 2–4, 6, 7, 11 и 14 – на станции 25; 8 – на станции 29; 9, 10, 12 и 18 – на станции 19 и 17 – на станции 24.

(79.8%), при заметном уменьшении количества планктонных *T. simonsenii*, *Thalassionema nitzschioides* и *O. aurita*, а также видов *Trachyneis aspera* и *Navicula peregrina*. Для данного комплекса характерны *Actinocyclus divisus*, *Metascolioneis tumida*, *Grammatophora arcuata*, *Navicula digitoradiata*, *Petroneis granulata*, *P. marina*, *Gyrosigma acuminata*, *Coronia decora* и *Tryblionella punctata*, а также виды *T. granulata*, *T. adducta*, *Frustulia lewisianus* var. *linearis*, *Frickea lewisiana* и *Scoliotropis latestriata* (рис. 6), обнаруженные в основном в осадках осушки (станции Л2–Л6).

Таким образом, выделенные в результате кластерного анализа диатомовые комплексы А, Б-1 и Б-2 очень близки по таксономическому составу и характеризуются резким доминированием вида *Paralia sulcata*; основное различие заключается в количественном соотношении видов, составляющих

основное ядро этих комплексов: *Thalassiosira simonsenii*, *Actinocyclus senarius*, *Thalassionema nitzschioides*, *Navicula peregrina*, *Trachyneis aspera*, *Pleurosigma angulatum*, *Delphineis surirella*, *Odontella aurita*, *Thalassiosira antarctica*, *T. hyperborea* и *Melosira arctica*.

Диатомовые комплексы выделенных кластеров различались экологической структурой (рис. 7). Комплексы кластера А (зал. Академии) характеризовались доминированием солоноватоводных видов (75–85.6%), значительным количеством морских (14.4–23.5%) и спорадическими находками пресноводных (0–1.5%) и эвригалинных (0–1%) видов. В соответствии с местообитанием среди них преобладали бенто-планктонные виды (68.5–80.2%), доля планктонных составляла 11.4–22.8%, а бентосных – 4.2–10.8%. В комплексах подкластера Б-2, включающего станции заливов Академии, Константина и Ульбанского залива, содержание



Рис. 5. Диатомеи из поверхностных осадков зал. Академии и Ульбанского залива (подкластер Б-2): *Melosira arctica* (1, 2), *M. moniliformis* var. *octogona* (3), *Actinocyclus curvatulus* (4), *Hyalodiscus obsoletus* (5), *Thalassiosira simonsenii* (6), *Paralia sulcata* (7), *Pleurosigma angulatum* (8), *Lithodesmium* sp. (9), *Coscinodiscopsis jonesiana* (10), *Cosmioneis grossepunctata* (11), *Trachyneis aspera* (12), *Diploneis smithii* (13), *D. subcincta* (14), *D. suborbicularis* (15), *D. mereschkowskyi* (16), *D. ovalis* (17), *Grammatophora marina* (18) и *Pseudogomphonema kamtschaticum* (19). Образцы 1, 2 и 19 собраны на станции 32; 3 и 17 – на станции 63; 4–10, 12 и 18 – на станции 21; 11 и 13–15 – на станции 49 и 16 – на станции 60.

солонатоводных видов было выше (85.2–93%), количество морских видов ниже (6.8–14.4%); содержание эвригалинных (0–1.8%) и пресноводных (0–0.8%) видов оставалось практически на том же уровне, что и в комплексах кластера А. Количество бенто-планктонных диатомей достигало 76.8–88%, планктонных снизилось до 7–14%, количество бентосных диатомей (3.6–9.4%) почти не изменилось. Комплексы подкластера Б-1 различались увеличением до 87.6–95.6% количества солонатоводных видов, заметным уменьшением (до 3.6–8.8%) морских и незначительным увеличением числа эвригалинных видов (0.2–2.8%);

количество пресноводных видов (0.2–0.8%) не изменилось по сравнению с таковым в комплексах кластера А. Количество бенто-планктонных видов достигло максимальных значений (79–91.4%), незначительно увеличилось количество бентосных видов (3.6–12.2%), а планктонные составили 3–11%.

Кроме диатомовых водорослей, в поверхностных осадках зал. Академии были обнаружены единичные скелеты силикофлагеллат или диктиохофициевых (класс Dictyochophyceae). Это *Octactis speculum* и *Stephanocha speculum* var. *minuta* – однокле-

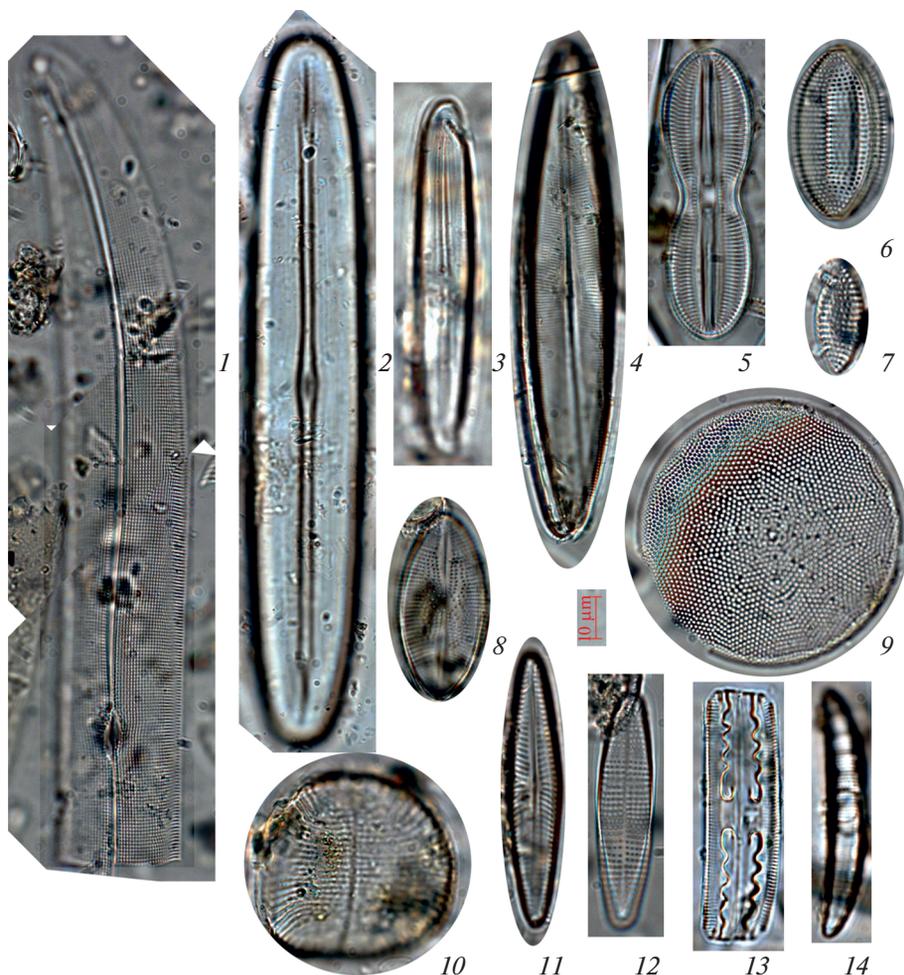


Рис. 6. Диатомеи, характерные для кутовой части Ульбанского залива (подкластер Б-1): *Gyrosigma balticum* (1), *Frickea lewisiana* (2), *Frustulia lewisiana* f. *linearis* (3), *Metascalioneis tumida* (4), *Diploneis interrupta* (5), *Tryblionella punctata* (6), *T. granulata* (7), *Petroneis granulata* (8), *Actinocyclus divinus* (9), *Coronina decora* (10), *Navicula digitoradiata* (11), *Delphineis kippae* (12) и *Grammatophora arcuata* (13 и 14). Образцы 1 и 8–11 собраны на станции Л3; 2, 13 и 14 – на станции Л6; 3 и 7 – на станции Л4; 4–6 – на станции 59 и 12 – на станции 61.

точные водоросли с кремневым скелетом, типичные обитатели морского и океанического планктона (табл. 2). Оба вида характерны для холодных водных масс (Takahashi, Blackweldert, 1992; Barron et al., 2016) и богатых нутриентами вод в регионах с прибрежным апвеллингом (Barron et al., 2016). Находки *O. speculum* в осадках кутовой части Ульбанского залива подтверждают, что он может обитать в опресненных морских водах (Глезер, 1966).

Количественное содержание диатомей в поверхностных осадках

Концентрация диатомей в осадках зал. Академии была неравномерной и варьировала от 0.72 до 4.29 млн створок/г (рис. 8, табл. 1). Низкое количество диатомей отмечено преимущественно в

песках и песчанистых илах зал. Константина и прибрежных станций Ульбанского залива и зал. Академии. Значительные концентрации диатомей наблюдались в илах на входе в зал. Академии, а также в северо-восточной и кутовой частях Ульбанского залива.

ОБСУЖДЕНИЕ

Доминирующий вид в поверхностных осадках зал. Академии *Paralia sulcata* (34–88.6%) мы принимаем *sensu lato*. Многочисленные морфологические и морфометрические данные, полученные главным образом с помощью сканирующей электронной микроскопии и генетического анализа, свидетельствуют, что *P. sulcata* включает несколько видов (Sawai et al., 2005; MacGillivray, Kaczmarzka, 2015; Yun et al., 2016). В данной работе мы не разделяли эти виды, но они имеют разные экологи-

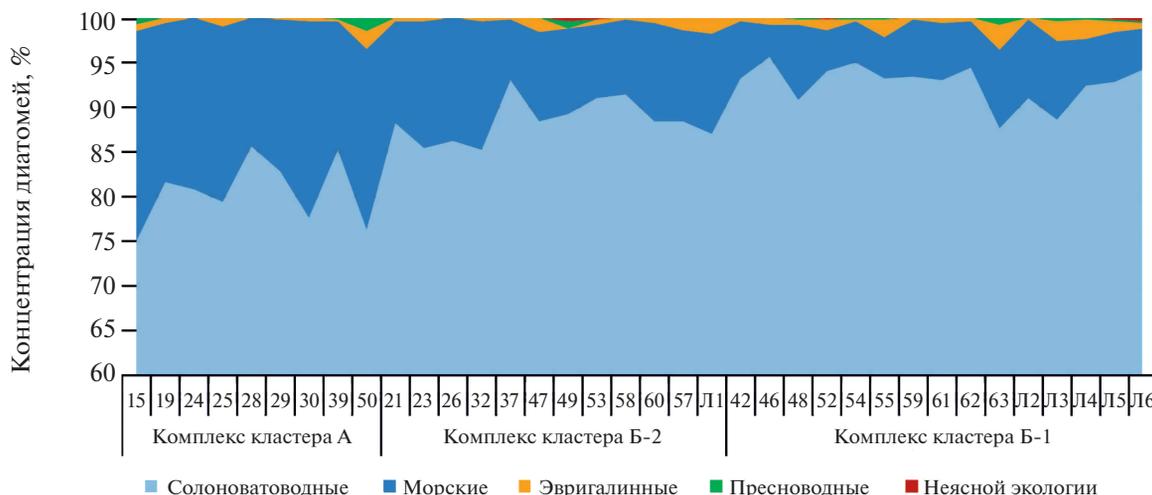


Рис. 7. Экологическая структура диатомовых комплексов кластеров, выделенных в поверхностных осадках заливов Академии, Константина и Ульбанского залива.

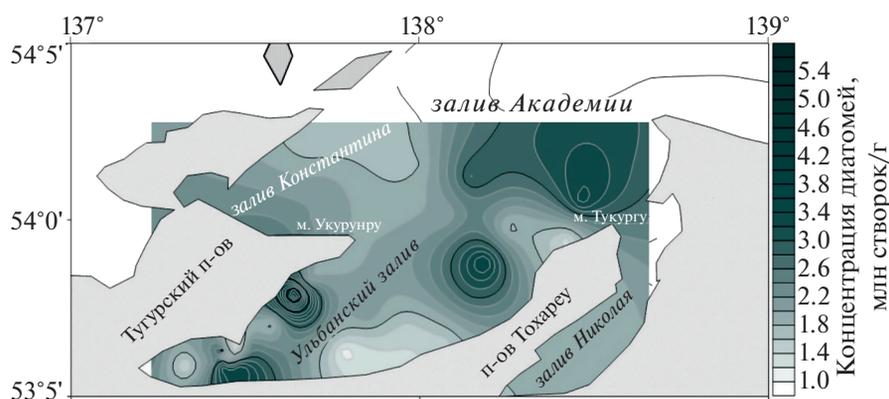


Рис. 8. Концентрация диатомей (млн створок/г) в поверхностных осадках зал. Академии.

ческие предпочтения, поэтому в будущих исследованиях необходимо различать виды группы *Paralia sulcata*, так как это важно для палеорекострукций.

Морской вид *P. sulcata* широко распространен в осадках, реже – в планктоне прибрежной, часто распресненной части моря (Жузе, 1962; Hendeу, 1964), и считается бенто-планктонным или тихопелагическим видом. Находки этого вида в осадках центральной части Охотского моря связывают с его транспортировкой различными природными процессами из районов шельфа (Wang, Wang, 2008). В планктоне его количество увеличивается из-за нагонных ветров, приливного перемешивания вод (Hendeу, 1964; Oh, Koh, 1995) или прибрежного апвеллинга (Abrantes, 1988). Численность и размер створок *P. sulcata* связаны со свойствами поверхностных вод и стабильностью водной толщи (Roelofs, 1984; Пушкарь, Черепанова, 2001; McQuoida, Nordberg, 2002). В изученных осадках зал. Академии преобладают формы *P. sulcata* с мелкими створками (диаметром

около 12 мкм), большие скопления которых связаны с хорошим вертикальным перемешиванием и обогащением вод питательными веществами (McQuoida, Nordberg, 2002). Вид распространен в песчаных и тонкозернистых осадках, богатых органическим материалом (Roelofs, 1984; Zong, 1997), и является важным источником питания для бентосных и планктонных животных (Gebühг et al., 2009). Количество *P. sulcata* в поверхностных осадках увеличивалось от входа в зал. Академии (в среднем 66.1%) по направлению к устью рек, впадающих в Ульбанский залив (в среднем 79.8%), которые различаются низким речным стоком (Семкин и др., 2022; Тищенко и др., 2022). Подобная картина наблюдалась в поверхностных осадках прибрежных районов заливов южной части Британской Колумбии (Roelofs, 1984).

Вид *P. sulcata* обладает сильноокремненным панцирем, хорошо сохраняющимся в осадках, но его массовое количество в изученных осадках не связано с избирательным растворением. Этот вид не был обнаружен в фитопланктоне зал. Акаде-

мии (Отчет ..., 2016). Его изобилие в осадках и редкие находки или отсутствие в планктоне на мелководье Охотского моря связаны с придонным характером обитания (Жузе, 1962). Таким образом, доминирование вида *P. sulcata* в осадках зал. Академии обусловлено в основном комфортными для этого вида условиями обитания. Его преобладание, наряду с другими бенто-планктонными (*Actinoptychus senarius*, *Odontella aurita* и *Thalassiosira hyperborea*) и бентосными (*Pleurosigma angulatum*, *Delphineis surirella*, *Navicula peregrina* и *Trachyneis aspera*) видами, характерными для распресненных прибрежных районов моря, указывает на значительную роль микрофитобентоса в зал. Академии.

Комплексы диатомей выделенных кластеров характеризовались близким таксономическим составом, но их экологическая структура различалась. Наиболее заметные различия отмечены у комплексов кластера А и подкластера Б-1: по направлению от входа в зал. Академии к кутовой части Ульбанского залива количество солоноватоводных и эвригалинных видов увеличивалось, а количество морских заметно уменьшалось, что отражало снижение солёности вод в этом направлении от 32 до 8‰ (Семкин и др., 2022; Тищенко и др., 2022). Ничтожное количество пресноводных видов в осадках кутовой части Ульбанского залива, куда впадают реки Ульбан и Сыран, подтвердило незначительную роль речного стока в этом заливе (Семкин и др., 2022; Тищенко и др., 2022).

Концентрация диатомей – важный показатель, широко используемый для палеореконовструкций и отражающий биопродуктивность вод, гидробиологические условия и седиментацию (Жузе, 1962; Полякова, 1997; Пушкарь, Черепанова, 2001; Цой и др., 2009; Обрезкова и др., 2014). Концентрация диатомей преимущественно в илах, распространенных на входе зал. Академии и в кутовой части Ульбанского залива (рис. 8) закономерна, поскольку обычно наибольшая их концентрация наблюдается в мелкоалевритовой фракции илов, размер частиц которой близок среднему размеру (около 50 мкм) створок диатомовых водорослей (Жузе, 1962). Значительные концентрации диатомей (рис. 8) связаны также с высоким содержанием биогенных веществ (нитраты, фосфор, аммоний и кремний) в поверхностных и придонных водах этих районов, стимулирующих биопродуктивность вод. Предполагается, что источником этих веществ служат фекалии млекопитающих – косаток, белух и лахтаков, которые питаются пришедшими на нерест лососями (Тищенко и др., 2022). Заметная концентрация диатомей в осадках северо-восточной части Ульбанского залива, где не отмечено значительной концентрации биогенных веществ, возможно, связана с перераспределением осадков придонными водными массами по эрозионной ложбине, которая выходит в этом районе (Белоус и др., 2023).

Средняя концентрация диатомей в осадках зал. Академии (2.9 млн створок/г) сопоставима с таковой в осадках Сахалинского залива (2.3 млн створок/г) (Обрезкова, 2009) и Чукотского моря (3 млн створок/г) (Полякова, 1997; Обрезкова и др., 2014), но заметно ниже, чем в осадках высокопродуктивного северного (12.7 млн створок/г) (Цой и др., 2009) и западного (5.3 млн створок/г) шельфов (Цой, Емельянова, 2021) Охотского моря и Амурского залива Японского моря (6.3 млн створок/г) (Цой, Моисеенко, 2014). Относительно низкое содержание диатомей в осадках зал. Академии, вероятно, связано с суровыми гидрологическими и климатическими условиями региона, близкими к арктическим. Особенности осадков, представленных преимущественно илистыми песками с включениями гальки, щебня и ракушки, и активный гидродинамический режим также не способствовали значительному накоплению диатомей.

Таким образом, в поверхностных осадках зал. Академии обнаружена богатая диатомовая флора (187 видов и внутривидовых таксонов), представленная преимущественно морскими и солоноватоводными видами. Доминирование в этих осадках *P. sulcata* указывает на комфортные для него условия обитания и накопления – активный гидродинамический режим, песчаные осадки, низкий речной сток и распресненность прибрежных вод. Преобладание бенто-планктонных и бентосных видов свидетельствует о значительной роли микрофитобентоса в зал. Академии. Выделенные с помощью кластерного анализа диатомовые комплексы поверхностных осадков довольно однородны по таксономическому составу, но различаются экологической структурой, которая определяется, главным образом, солёностью вод. Ничтожное количество пресноводных диатомей даже в кутовой части Ульбанского залива указывает на незначительное влияние речного стока на осадконакопление. Высокая концентрация диатомей в осадках открытой части зал. Академии и кутовой части Ульбанского залива обусловлена литологическим составом осадков и высокой продуктивностью вод в этих районах. Относительно низкое содержание диатомей в осадках зал. Академии, по сравнению с таковым в осадках шельфовых районов морей северо-востока России, связано с активным гидродинамическим режимом и суровыми климатическими условиями региона, близкими к арктическим.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ

Настоящая статья не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке совместного гранта Российского фонда фундаментальных исследований и Государственного фонда естественных наук Китая (ГФЕН_а: № 21-55-53015) и Министерства науки и высшего образования (проект № 121021700342-9).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят членов экипажей НИС “Профессор Гагаринский” и НИС “Академик Опарин” за всестороннюю помощь, а также С.П. Куклу и Э.А. Акулову за отбор образцов, Л.В. Осипову за химико-техническую обработку и приготовление препаратов для анализа диатомей и выражают признательность Н.К. Вагиной за редактирование рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астахов А.С.* Позднечетвертичное осадконакопление на шельфе Охотского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1986. 140 с.
- Бегун А.А., Рябушко Л.И.* Бентосные диатомовые водоросли российских вод Японского моря и сопредельных акваторий // Биол. моря. 2020. Т. 46. № 4. С. 231–241.
<https://doi.org/10.31857/S0134347520040026>
- Белоус О.В., Леонова Т.Д., Валитов М.Г.* Природные условия и рельеф дна залива Академии (Охотское море) // Тихоокеан. геология. 2023. Т. 42. № 1. С. 33–44.
<https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-1-33-44>
- Варнавский В.Г., Жаров А.Э., Кириллова Г.Л. и др.* Геология и нефтегазоносность Охотско-Шантарского осадочного бассейна. Серия “Осадочные бассейны Востока России”. Т. 1. Владивосток: ДВО РАН. 2002. 148 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия моря. Т. 9. Охотское море. СПб.: Гидрометеиздат. 1998. Вып. 1. 342 с.
- Глезер З.И.* Кремневые жгутиковые водоросли (силикофлагелаты) // Флора споровых растений СССР. М.-Л.: Наука. 1966. Т. 7. 332 с.
- Жузе А.П.* Стратиграфические и палеогеографические исследования в северо-западной части Тихого океана. М.: Изд-во АН СССР. 1962. 260 с.
- Жузе А.П., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова-Порецкая В.С.* Методика исследования // Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. Л.: Наука. 1974. С. 50–79.
- Киселев И.А.* Состав и распределение фитопланктона в Амурском лимане // Исследование морей СССР. 1931. Вып. 14. С. 31–116.
- Кулаков А.П.* Морфотектоника и палеогеография материкового побережья Охотского и Японского морей в антропогене. М.: Наука. 1980. 176 с.
- Леонова Т.Д., Белоус О.В.* Типизация берегов Западного Приохотья и тенденции их развития // Изв. РАН. Серия геогр. 2021. Т. 85. № 3. С. 422–432.
<https://doi.org/10.31857/S2587556621030092>
- Мельников В.В., Федорев Ю.В., Семкин П.Ю. и др.* Гидробиологические особенности заливов Шантарского района в связи с летним нагулом полярных китов охотской популяции // Океанология. 2020. Т. 60. № 2. С. 244–249.
<https://doi.org/10.31857/s0030157420020070>
- Обрезкова М.С.* Диатомей поверхностных осадков Амурского лимана и прилегающих акваторий (Японское и Охотское моря) // Биол. моря. 2009. Т. 35. № 2. С. 138–150.
<https://doi.org/10.1134/S1063074009020059>
- Обрезкова М.С., Колесник А.Н., Семилетов И.П.* Распределение диатомей в поверхностных осадках морей Восточной Арктики России // Биол. моря. 2014. Т. 40. № 6. С. 465–472.
- Орлова Т.Ю., Селина М.С., Стоник И.В.* Видовой состав микроводорослей планктона Охотоморского побережья острова Сахалин // Биол. моря. 2004. Т. 30. № 2. С. 96–104.
- Отчет о результатах экспедиционного исследования в 71-м рейсе НИС “Профессор Гагаринский” (с 01 июля по 12 августа 2016 г.). Владивосток: ТОИ ДВО РАН. 2016. 187 с.
- Петров Е.С., Новооцкий П.В., Ленишин В.Т.* Климат Хабаровского края и Еврейской автономной области. Владивосток – Хабаровск: Дальнаука. 2000. 174 с.
- Полякова Е.И.* Арктические моря Евразии в позднем кайнозое. М.: Научный мир. 1997. 146 с.
- Пушкарь В.С.* Биостратиграфия осадков позднего антропогена юга Дальнего Востока (по данным диатомового анализа). М.: Наука. 1979. 140 с.
- Пушкарь В.С., Черепанова М.В.* Диатомей плиоцена и антропогена Северной Пацифики: стратиграфия и палеоэкология. Владивосток: Дальнаука. 2001. 228 с.
- Разжиганова Н.Г., Гребенникова Т.А., Ганзей Л.А. и др.* Стратиграфия водораздельного торфяника и развитие природной среды острова Большой Шантар в позднеледниковье–голоцене // Тихоокеан. геология. 2021. Т. 40. № 3. С. 85–102.
<https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-3-85-102>
- Рогачев К.А.* Спутниковые наблюдения регулярных вихрей в бухтах Шантарского архипелага Охотского моря // Известия, Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 9. С. 993–998.
<https://doi.org/10.1134/S0001433812090149>
- Рогачев К.А., Шлык Н.В.* Струйное течение Шантарского архипелага по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 5. С. 68–75.
- Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Павлова Г.Ю. и др.* Карбонатная система эстуариев рек Сыран и Ульбан (Ульбанский залив Охотского моря) в период летнего паводка // Водн. ресурсы. 2022. Т. 49. № 5. С. 869–979.
<https://doi.org/10.1134/S0097807822050141>
- Смирнова Л.И.* Фитопланктон Охотского моря и прикурильского района // Тр. Института океанологии. Т. 30. Биологические исследования моря (планктон). М.: Изд-во АН СССР. 1959. С. 3–51.
- Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Тищенко П.П. и др.* Гидрохимические исследования залива Академии (Охотское море) // Океанология. 2022. Т. 62. № 1. 80–92.
<https://doi.org/10.1134/S0001437022010155>
- Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Шулькин В.М. и др.* Комплексные исследования прибрежных акваторий Японского и Охотского морей, находящихся под влиянием речного стока (71-й рейс научно-исследовательского судна “Профессор Гагаринский”) // Океанология. 2018. Т. 58. № 2. С. 340–342.
<https://doi.org/10.7868/S00301574180>

- Цой И.Б., Емельянова Э.А. Атлас диатомовых водорослей Дагинского грязевого вулкана (Восточный Сахалин). Владивосток: ТОИ ДВО РАН. 2021. 220 с.
- Цой И.Б., Моисеенко И.А. Диатомеи поверхностных осадков Амурского залива Японского моря // Биол. моря. 2014. Т. 40. № 1. С. 12–25.
- Цой И.Б., Обрезкова М.С. Атлас диатомовых водорослей и силикофлагеллат голоценовых осадков морей Восточной Арктики России. Владивосток: ТОИ ДВО РАН. 2017. 146 с.
- Цой И.Б., Обрезкова М.С., Артемова А.В. Диатомеи поверхностных осадков Охотского моря и северо-западной части Тихого океана // Океанология. 2009. Т. 49. № 1. С. 141–150.
- Abrantes F. Diatom assemblages as upwelling indicators in surface sediments off Portugal // Mar. Geol. 1988. V. 85. № 1. P. 15–39. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90082-5)
- Barranguet C., Herman P.M.J., Sinke J.J. Microphytobenthos biomass and community composition studied by pigment biomarkers: importance and fate in the carbon cycle of a tidal flat // J. Sea Res. 1997. V. 38. № 1–2. P. 59–70.
- Barron J.A., Bukry D., Ager T.A. Holocene evolution of diatom and silicoflagellate paleoceanography in Slocum Arm, a fjord in southeastern Alaska // Marine Micro-paleontology. 2016. V. 126. № 5. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2016.05.002>
- Gebühr C., Wiltshire K.H., Aberle N. et al. Influence of nutrients, temperature, light and salinity on the occurrence of *Paralia sulcata* at Helgoland Roads, North Sea // Aquatic Biology. 2009. V. 7. P. 185–197. <https://doi.org/10.3354/ab00191>
- Hendey N.I. An Introductory Account of the Smaller Algae of British Coastal Waters. London: Her Majesty's Stationary Office. 1964. 317 p.
- Karsten U., Schilke C., Becker B. Benthic diatoms in Arctic seas – ecological functions and adaptations // Polarforschung. 2012. V. 81. № 2. P. 77–84.
- MacGillivray M.L., Kaczmarek I. *Paralia* (Bacillariophyta) stowaways in ship ballast: implications for biogeography and diversity of the genus // Journal of Biological Research-Thessaloniki. 2015. V. 22. № 2. <https://doi.org/10.1186/s40709-015-0024-5>
- McQuoida M.R., Nordberg K. The diatom *Paralia sulcata* as an environmental indicator species in coastal sediments // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2002. V. 56. № 2. P. 339–354. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00187-7](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00187-7)
- Oh S.H., Koh C.H. Distribution of diatoms in the surficial sediments of the Mangyung-Dongjon tidal flat, west coast of Korea (Eastern Yellow Sea) // Mar. Biol. 1995. V. 122. P. 487–496.
- Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T. et al. Bioaerosols as evidence of atmospheric circulation anomalies over the Okhotsk Sea and Shantar Islands in the late Glacial–Holocene // Climate. 2022. V. 10. № 2. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/cli10020024>
- Roelofs A.K. Distributional patterns and variation of valve diameter of *Paralia sulcata* in surface sediments of Southern British Columbia Inlets // Estuar. Coast. Shelf Sci. 1984. V. 18. № 2. P. 165–176. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(84\)90104-5](https://doi.org/10.1016/0272-7714(84)90104-5)
- Rogachev K.A., Carmack E.C., Foreman M.G.G. Bowhead whales feed on plankton concentrated by estuarine and tidal currents in Academy Bay, Sea of Okhotsk // Cont. Shelf Res. 2008. V. 28. № 14. P. 1811–1826. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.04.014>
- Sawai Y., Nagumo T., Toyoda K. Three extant species of *Paralia* (Bacillariophyceae) along the coast of Japan // Phycologia. 2005. V. 44. № 5. P. 517–529.
- Takahashi K., Blackwelder P.L. The spatial distribution of silicoflagellates in the region of the Gulf Stream warm-core ring 82B: application to water mass tracer studies // Deep Sea Res. Part A. 1992. V. 39. Suppl. 1. P. S327–S346.
- Wang W.L., Wang L.C. Reconstruction of oceanographic changes based on the diatom records of the central Okhotsk Sea over the last 500000 years // Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2008. V. 19. P. 403–411. <https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.4.403>
- Yun S.M., Lee S.D., Park J.S., Lee J.-H. A new approach for identification of the genus *Paralia* (Bacillariophyta) in Korea based on morphology and morphometric analyses // Algae. 2016. V. 31. № 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.4490/algae.2016.31.3.7>
- Zong Y. Implications of *Paralia sulcata* abundance in Scottish isolation basins // Diatom Res. 1997. V. 12. № 1. P. 125–150. <https://doi.org/10.1080/0269249X.1997.9705407>

Diatoms in Surface Sediments of the Academy Bay of the Sea of Okhotsk

I. B. Tsoy^a and I. A. Prushkovskaya^a

^a*Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok 690041, Russia*

The study of diatoms in the surface sediments of the Academy Bay (Sea of Okhotsk) revealed a rich diatom flora (187 species and intraspecific taxa), represented mostly by marine and brackish water species. The predominance of benthic-planktonic and benthic species indicates a significant role of microphytobenthos in the Academy Bay. The diatom assemblages distinguished with the use of cluster analysis are homogeneous in their taxonomic composition, but differ in ecological structure, which is mainly determined by water salinity. The concentration of diatoms in the sediments in the open part of the Academy Bay and in the apex of the Ulban Bay depends on a high productivity of waters and the lithological composition of sediments. A relatively low content of diatoms in the sediments is associated with the severe climatic conditions of the region that is close to the Arctic.

Keywords: diatoms, surface sediments, microphytobenthos, Academy Bay, Shantar Region