

УДК 551.89:56.024

ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА РАДИОЛЯРИЙ *Cycladophora davisiana* КАК ОТРАЖЕНИЕ ВЕРОЯТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ВОДЫ СЕВЕРНОЙ ПАЦИФИКИ ВО ВРЕМЯ ПОСЛЕДНЕГО ЛЕДНИКОВОГО МАКСИМУМА

© 2015 г. А. Г. Матуль¹, А. Абельман², Р. Герзонде², Д. Нюрнберг³, Р. Тидеман², С. Б. Кругликова¹¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

e-mail: amatul@mail.ru

²Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера, Бремерхафен, Германия³Институт морских исследований им. Лейбница, Киль, Германия

Поступила в редакцию 06.06.2013 г., после доработки 02.10.2013 г.

Сопоставление микропалеонтологических данных по распределению вида радиолярий *Cycladophora davisiana* в пробах поверхностного слоя осадков и колонках позднечетвертичных отложений из субарктической Пацифики и дальневосточных окраинных морей позволило сделать возможные выводы по условиям и распространению промежуточной водной массы во время максимальной стадии последнего оледенения. Используются современные сведения по *C. davisiana*, который служит микропалеонтологическим индикатором холодной, хорошо обеспеченной кислородом верхней части промежуточной водной массы, которая формируется сейчас только в Охотском море. Нахождение высоких концентраций *C. davisiana* в осадках максимума последнего оледенения может указывать на вероятное образование и распространение вентилированной промежуточной воды на большей части субарктической палео-Пацифики: в Беринговом и Охотском морях, в пределах СЗ круговорота, в Аляскинском заливе.

DOI: 10.7868/S003015741501013X

ВВЕДЕНИЕ

В северном полушарии активная термогалинная вентиляция (обогащение кислородом) промежуточной и глубинной воды происходит в Норвежско-Гренландском бассейне при охлаждении соленой североатлантической воды [54]. Основные следствия этого процесса – регулирование глобального и регионального теплового баланса и сток атмосферного углекислого газа в океан [15]. Во время максимума последнего оледенения (МПО) около 21 тыс. л. н. вентиляция в Северной Атлантике не прекращалась, но ограничивалась промежуточными глубинами; ее основной район смещался из Норвежско-Гренландского бассейна в Лабрадорское море и северо-западную окраину открытой Атлантики [48]. В субарктической Пацифике сейчас нет глубокой конвекции и, соответственно, вентиляции с поверхности океана [65]. Только в окраинном Охотском море наблюдается вентиляция на промежуточных глубинах 200–1000 м при перемешивании плотной, холодной, насыщенной кислородом шельфовой воды с промежуточной водой тихоокеанского происхождения; затем вентилированные промежуточные водные массы распространяются в северную часть Тихого океана [55].

В МПО термогалинная вентиляция могла происходить на всей СЗ Пацифике к северу от субполярного фронта, включая окраинные Охотское и Берингово моря [26], поэтому субарктическая область Тихого океана должна была становиться важным районом трансформации водных масс, вовлеченных в глобальный термогалинный конвейер. Данные по современному и четвертичному формированию вентилированной воды приходят большей частью из изотопных и геохимических исследований [25]. Наша статья обсуждает проблему вентиляции в ледниковое время, используя сведения по распределению в четвертичных осадках вида радиолярий *Cycladophora davisiana*, который может рассматриваться в качестве индикатора богатой кислородом верхней части современной промежуточной водной массы Охотского моря (ОПВМ) [9].

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Северная Пацифика к северу от 40° с.ш. (рис. 1а) имеет четко выраженную субарктическую вертикальную структуру (рис. 1б) с основным галоклином в верхних 200 м водного столба [60], который поддерживается преобладанием осадков над ис-

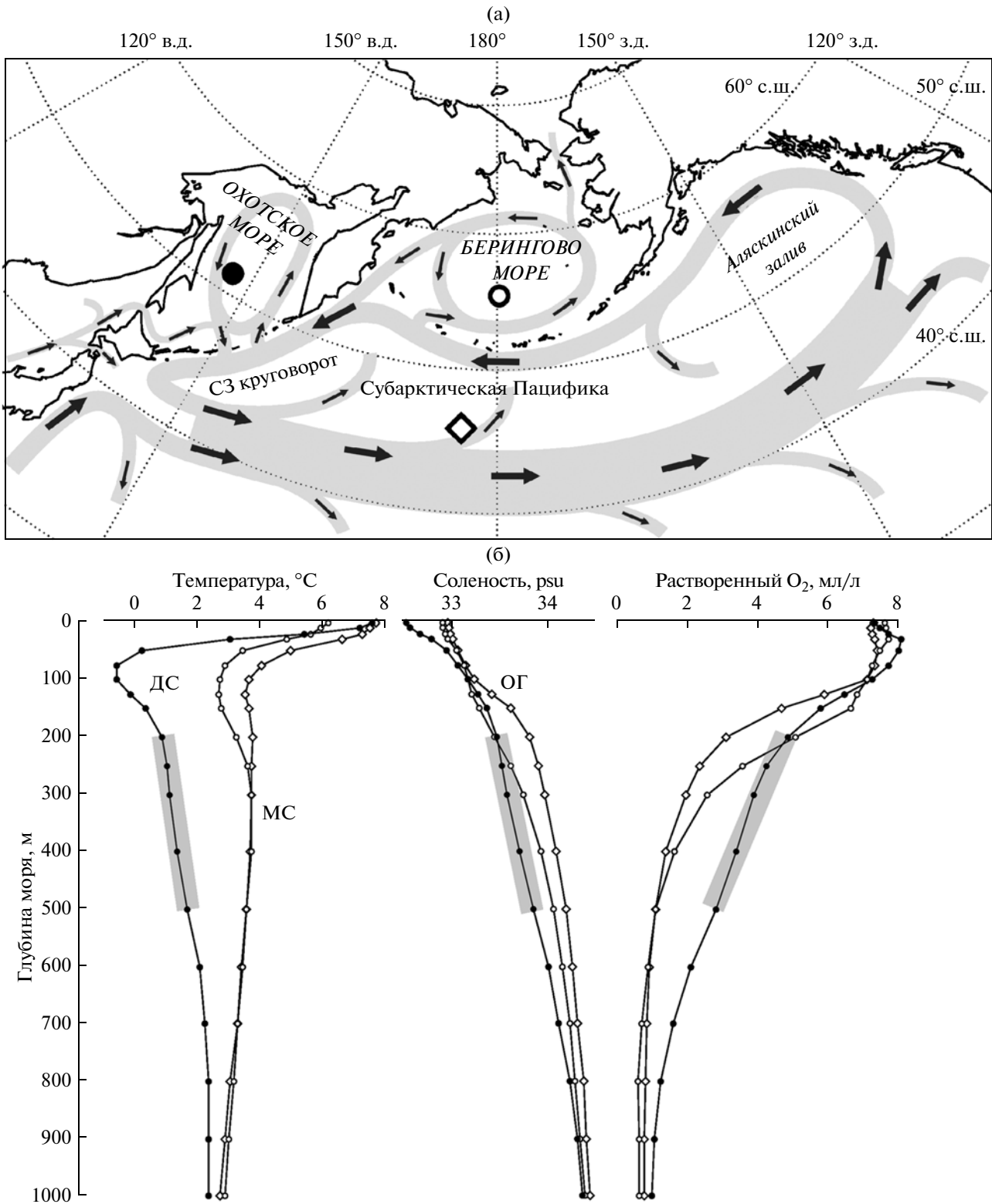


Рис. 1. Водная циркуляция на поверхности Северной Пацифики (а) по [1, 60] и среднегодовая вертикальная структура воды (б) по [16]. Ромб – открытая субарктическая Пацифика, пустой кружок – Берингово море, заштрихованный кружок – Охотское море; на рис. 1а эти значки показывают стандартные точки из World Ocean Atlas 2001 [16]. На рис. 1б ДС означает дихотермальный слой, МС – мезотермальный слой для Берингова моря и открытой субарктической Пацифики, ОГ – основной галоклин, серая линия – верхнюю часть ОПВМ. Бланк карты построен в компьютерной программе PanMap (<http://www.pangaea.de>) по данным батиметрического атласа GEBCO (<http://www.gebco.net>). Графики построены в компьютерной программе PanPlot (<http://www.pangaea.de>).

парением [65]. Внутри галоклина образуется слой подповерхностного температурного минимума или дихотермальный слой с температурой от 2–2.5°C в открытом океане до –2°C в Охотском море как “остаток” зимнего охлаждения с поверхности. Основной галоклин создает резкий пикноклин, препятствующий свободной вертикальной конвекции. Прямая вентиляция на глубину более 200 м отмечается только в Охотском море, а не прямая вентиляция в виде вертикальной диффузии – в северо-западном круговороте и в Аляскинском заливе [56]. Слабовентилированная промежуточная вода (мезотермальная – с максимумом температуры по отношению к вышележащему дихотермальному слою и нижележащей глубинной воде) открытой Северной Пацифики (ТПВМ) на глубинах 300–800 м имеет температуру 3–4°C, соленость 33.5–33.9 psu и концентрацию растворенного кислорода 1–3 мл/л [16, 56, 61]. В Беринговом море вертикальная структура похожа на северотихоокеанскую, но дихотермальный и мезотермальный горизонты более холодные [60]. В Охотском море нет мезотермального слоя, а подповерхностная и промежуточная вода гораздо холоднее и богаче кислородом: от –2 до 1°C и 5–7 мл/л O₂ в дихотермальном слое, 1–2°C и 1.5–5 мл/л O₂ в промежуточном слое [58, 59].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Палеоокеанологический индикатор в нашем исследовании – вид радиолярий *Cycladophora davisiana* (Ehrenberg). В [9] на основе составления карт распределения и факторного анализа выявлена тесная связь высоких концентраций *C. davisiana* в планктоне и современных осадках Охотского моря с условиями холодной, хорошо вентилированной ОПВМ. Для видового определения использовано морфологическое описание современных и плейстоценовых экземпляров *Cycladophora davisiana* (Ehrenberg) *davisiana* (Petrush-evskaya) из [10].

Данные по современному распределению *C. davisiana* в Мировом океане собраны в [14], а детальные сведения для СЗ Пацифики и окраинных морей приведены в [9, 30, 35, 50, 64]. Кроме того, привлечены собственные количественные подсчеты *C. davisiana* в пробах поверхностного слоя осадков, полученных в Беринговом море и открытой Северной Пацифике по проекту ИНОПЕКС (INOPEX), а также результаты пересчета радиолярий, сделанные А. Абельман в препаратах, ранее исследованных в [50]. Данные по *C. davisiana* в отложениях МПО взяты из 57 колонок донных осадков (таблица, где приведены ссылки на источники данных): 11 из Охотского моря, 14 из Берингова моря, 32 из открытой Северной Пацифики к северу от 35°–37° с.ш. Численные значения относительной концентрации

(%) *C. davisiana* получены из файлов первичных данных по колонкам LV и SO (таблица), а также считаны с графиков распределения по колонкам из публикаций, перечисленных в таблице.

Для анализа распределения *C. davisiana* в осадках максимальной фазы последнего оледенения мы выбрали интервал стандартной изотопно-кислородной стадии (ИКС) 2 с нижней границей 24 тыс. л. н. [33]. Но верхнюю границу мы ограничили уровнем 17 тыс. л. н., когда в разных районах северной части Тихого океана началось потепление пребёллинг как первый признак последней дегляциации [18, 22]. Ссылки на источники стратиграфии и хронологии колонок указаны в таблице. Если для использованных нами колонок имелась детально разработанная возрастная модель, процентные значения концентрации *C. davisiana* осреднялись с точностью до целого процента для точно определенного интервала 24–17 тыс. л. н. Если возрастная модель была представлена только в общем виде и/или с низким временным разрешением, процентные значения концентрации *C. davisiana*, также с осреднением до целого процента, взяты из всего предполагаемого интервала ИКС 2 или с уровня, относящегося к ИКС 2 или МПО. Таким образом, мы анализируем распространение *C. davisiana* в целом для интервала, который соответствует максимальному развитию последнего оледенения, а не для обособленного временного уровня.

Следует указать один аспект нашего анализа распределения *C. davisiana*, связанный с использованием разных фракций осадка для приготовления препаратов радиолярий; он может потенциально исказить наши результаты. Мы собрали данные о *C. davisiana* из разных фракций осадка (таблица). Фракция >63 мкм содержит преимущественно “взрослые” экземпляры *C. davisiana* с развитым первым абдоминальным сегментом, т.к. его диаметр для плейстоценовых форм составляет 68.5–74.7 мкм [10]. Фракция >40–50 мкм может вдобавок содержать ювенильные (цефалис + торакс) и/или меньшие или “угнетенные” в развитии “взрослые” формы. Сопоставление концентраций *C. davisiana* в разных фракциях поверхностного слоя осадков из Охотского моря [9, 35] показывает большие численные значения во фракции >63 мкм по сравнению с фракцией >40 мкм: от 24–26 до 34–38% и от 21–22 до 27–29%, соответственно. Следовательно, использование более крупнозернистой фракции дает несколько завышенные (на 3–9%) величины максимального содержания *C. davisiana*, по крайней мере, для Охотского моря. Однако, на наш взгляд, в данной работе такие отклонения не должны иметь решающего значения, т.к. мы в дальнейшем будем обсуждать концентрации *C. davisiana* >20–50%.

Распределение *C. davisiana* в осадках максимальной стадии последнего оледенения из субарктической Пацифики

Колонка	Широта, град с.ш.	Долгота, град в.д., “-” означает град з.д.	Район	Обоснование возрастной модели	<i>C. davisiana</i> (% , осреднено для ИКС 2)	Источник данных по <i>C. davisiana</i>	Фракция осадка, мкм		
LV29-69-3	45.44	144.07	Охотское море	Литостратиграфия [11]	51	Настоящая работа	>40		
LV29-114-3	49.37	152.88		Литостратиграфия, датирование ¹⁴ C [34]	44				
LV27-8-4	51.50	150.57		Тэфро- и литостратиграфия [17]	32				
LV27-15-1	49.00	152.19			52				
LV28-41-4	51.68	149.07		Лито- и $\delta^{18}\text{O}$ -стратиграфия, датирование ¹⁴ C [43]	26			[32]	
LV28-44-3	52.04	153.10			39				
LV28-42-4	51.71	150.98			36				[5]
LV27-5-3	54.77	149.50		Био- и литостратиграфия [6]	43			[6]	
MD01-2412	44.53	145.0		$\delta^{18}\text{O}$ -стратиграфия, датирование ¹⁴ C [46]	47			[46]	>45
MD01-2415	53.95	149.96		Лито- и $\delta^{18}\text{O}$ -стратиграфия [42]	40			[7]	>40
LV27-2-4	54.50	144.75	Лито- и $\delta^{18}\text{O}$ -стратиграфия, датирование ¹⁴ C [19]	55	[19]				
SO201-2-77	56.33	170.70	Берингово море	Литостратиграфия, датирование ¹⁴ C [34]	34	Настоящая работа			
DC2-81(12)	60.60	-178.90		Датирование ¹⁴ C [13]	28			[13]	
DC4-80(12)	59.60	179.60			22				>62
DC5-80(26)	58.30	-176.30			16				
RC14-120	55.77	-170.43		Биостратиграфия, датирование ¹⁴ C [38]	43			[38]	>63
RC14-121	54.85	-170.68			28				
RC14-126	60.0	173.35			41				
V21-161	59.57	179.25			42				
B4-2	57.95	-179.94		Биостратиграфия [63]	32			[63]	>40
B2-9	59.29	-178.70			25				
PC-23A	60.16	-179.46	Литостратиграфия, датирование ¹⁴ C [24]	40	[24]	>45			
BOW-9A	54.04	178.68	Магнито- и $\delta^{18}\text{O}$ -стратиграфия [57]	43	[57]	>63			
BOW-12A	53.39	-179.56		28					
UMK-3A	54.42	-170.22		30					
ES	49.74	168.32		22					
V21-173	44.37	-163.55	Открытая Северная Пацифика	Био- и магнито-стратиграфия [51]	6	[51]	>63		
RC10-178	37.80	172.33		Био-, лито- и $\delta^{18}\text{O}$ -стратиграфия [50]	3	[50]	>63		
RC12-412	40.68	166.98			7				
RC12-413	43.28	166.90			18				
RC12-419	40.10	171.50			7				
V20-119	47.95	168.78			22				
V20-124	45.83	154.50			38				
V20-129	37.68	156.58			6				
V21-146	37.68	163.03			5				
V21-151	52.27	163.63		36					

Таблица. Окончание

Колонка	Широта, град с.ш.	Долгота, град в.д., “-” означает град з.д.	Район	Обоснование возрастной модели	<i>C. davisiana</i> (% , осреднено для ИКС 2)	Источник данных по <i>C. davisiana</i>	Фракция осадка, мкм
Vit4110	45.78	-160.17		Био- и литостратиграфия [4]	4	[4]	>50
Vit4075	39.55	-176.02			5		
Vit4084	34.98	-172.93			2		
RC14-103	44.03	152.93		Био- и магнитостратиграфия [39]	38	[39]	>63
RC14-105	39.68	157.55			9		
RC14-106	45.83	155.70			35		
RC14-112	50.25	164.90			23		
V20-120	47.40	167.75			28		
V20-121	46.97	164.27			31		
V20-122	46.57	161.68			35		
V20-123	46.25	157.92			34		
V20-125	43.48	154.37			28		
V20-126	42.15	155.87			17		
RC12-401	40.83	148.13		Биостратиграфия [36]	21	[36]	>63
RAMA 44PC	53.0	164.65		$\delta^{18}\text{O}$ -стратиграфия, датирование ^{14}C [27]	25	[27]	>63
GC-36	50.41	167.73		Био- и литостратиграфия [21]	22	[21]	?
DSDP 580	41.62	153.98		Био- и $\delta^{18}\text{O}$ -стратиграфия [40]	13	[40]	>63
ODP 881B	47.1	161.49			30		
ODP 883B	51.2	167.77			28		
ODP 887A	54.37	-148.45			24		
RC14-99	36.97	147.10	Биостратиграфия [37]	6	[37]	>63	

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В современных осадках Северной Пацифики *C. davisiana* высокие концентрации >10–20% от общего числа экземпляров в комплексах радиолярией образует в Охотском море, в то время как в открытой субарктической Пацифике и Беринговом море содержание вида редко превышает 5% [9, 30, 35]. Также есть сведения о высоком содержании *C. davisiana* в поверхностном слое Японского моря: >20% в северо-западном районе [8] и до 19% в северном районе [23].

В Охотском море наибольшая численность *C. davisiana* (рис. 2а) найдена на северном континентальном склоне и в северо-западной глубоководной впадине Дерюгина [3, 9, 31, 35]. Этот район расположен в северной половине общего циклонического круговорота Охотского моря, где перемешивание холодной плотной шельфовой воды с более соленой промежуточной тихоокеанской водой приводит к формированию вентили-

рованной ОПВМ [29, 56]. Планктонные исследования выявили максимальные количества *C. davisiana* на глубинах 200–500 м в верхней части ОПВМ [9]. По комплексным данным изучения планктона, седиментационных ловушек и поверхностного слоя осадков Охотского моря [9] сделали вывод, что *C. davisiana* предположительно является бактерио- и детритофагом, становится многочисленным при четко выраженных сезонных пиках поступления на глубину органической взвеси и детрита и населяет холодную, обогащенную кислородом промежуточную водную массу. Рисунки 2б–2в показывают, что верхняя часть ОПВМ, которая ассоциируется с местобитанием *C. davisiana*, имеет температуру 1–2°C и содержание растворенного кислорода 3–5 мл/л, в то время как в открытой субарктической Пацифике на этих глубинах вода теплее (мезотермальный слой) и содержит гораздо меньше кислорода.

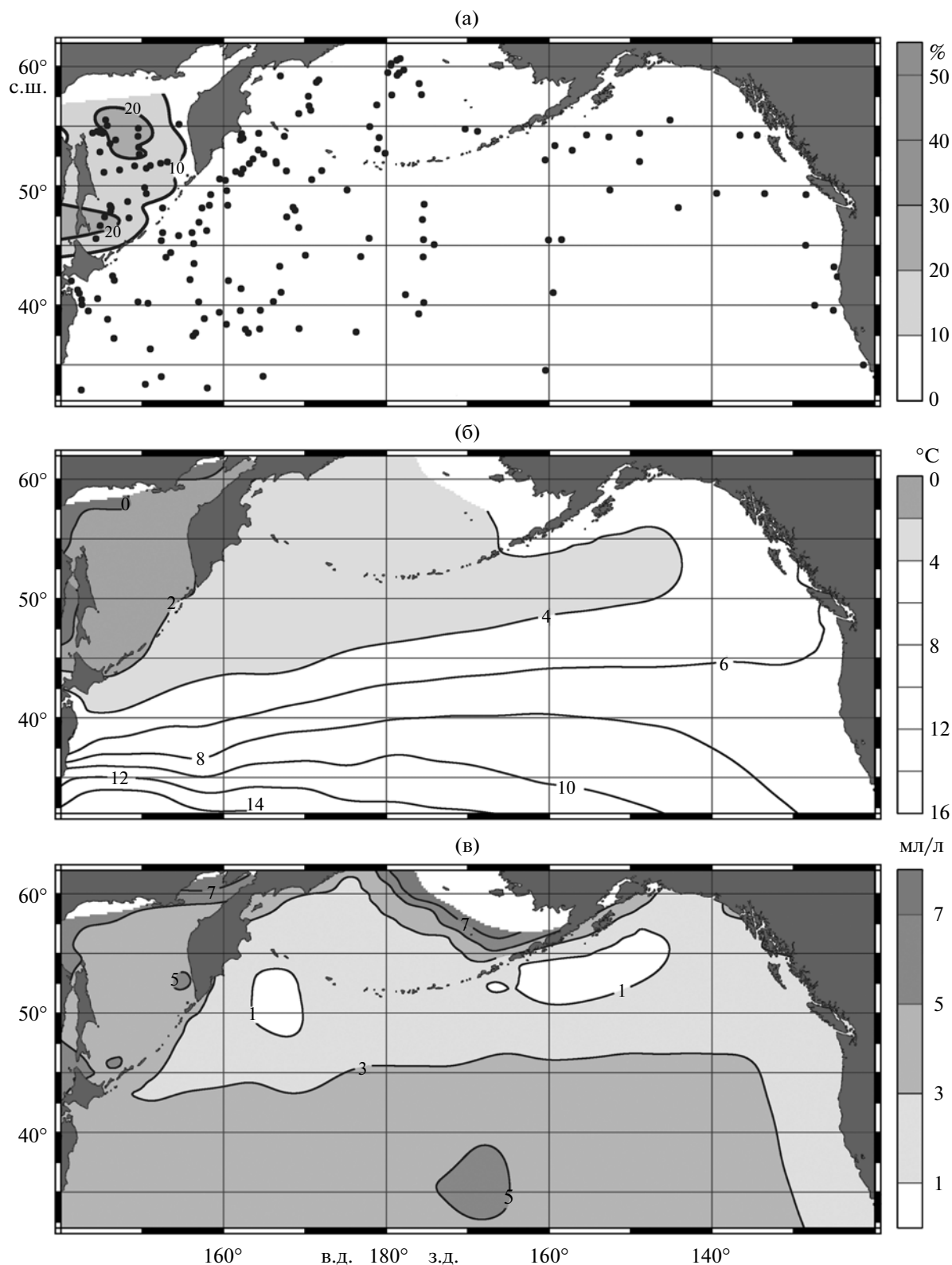


Рис. 2. Распределение *C. davisiana* в поверхностном слое осадков субарктической Пацифики (а) в сопоставлении со среднегодовой температурой (б) и содержанием растворенного кислорода (в), осредненными для слоя воды 200–500 м. Ссылки на источники данных по *C. davisiana* содержатся в тексте, гидрологические сведения взяты из World Ocean Atlas 2001 [16]. Карты построены в компьютерной программе Ocean Data View (<http://odv.awi.de>).

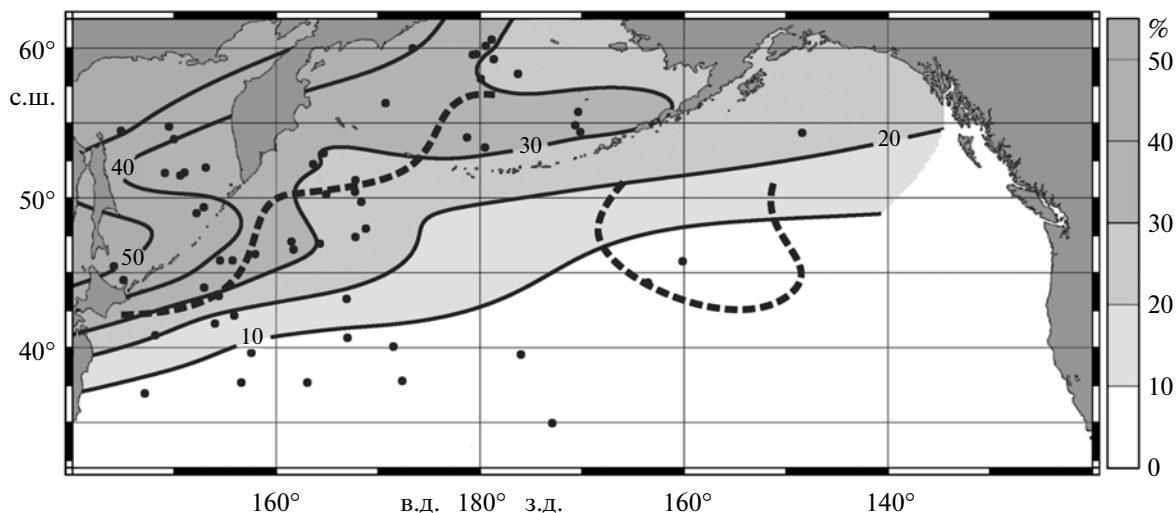


Рис. 3. Распределение *C. davisiana* в отложениях ИКС 2 субарктической Пацифики. Ссылки на источники данных содержатся в тексте и таблице. Штриховая линия показывает к северу и северо-западу от себя районы увеличения поверхностной солености на >1.2 psu в МПО [28]. Карта построена в компьютерной программе Ocean Data View (<http://odv.awi.de>).

В осадках последнего оледенения (рис. 3) *C. davisiana* многочислен везде в субарктической части Тихого океана: $>10\%$ к северу от 40° – 45° с.ш., $>20\%$ в Аляскинском заливе и вдоль Алеутских овов, $>30\%$ в пределах СЗ круговорота и в окраинных дальневосточных морях. Максимум концентрации *C. davisiana* 40–50% в осадках ИКС 2 обнаруживается в Охотском море.

Большое относительное содержание *C. davisiana* в комплексах радиолярий ИКС 2 – давно известный факт [4, 39, 50, 51]. Классическая палеоокеанологическая интерпретация этих данных [20, 35] переносит современные океанографические условия Охотского моря на открытую субарктическую Пацифику во время последнего оледенения: сильная приповерхностная стратификация с резко выраженным дихотермальным слоем, обширный сезонный ледовый покров, стабильная и ровная по вертикали промежуточная толща. Приуроченность максимального современного нахождения *C. davisiana* к зонам формирования гомогенной ОПВМ с мало изменчивыми параметрами подтверждаются в [9, 41]. Наличие верхнего стратифицированного слоя, возможно, не играет критической роли, т.к. высокие концентрации *C. davisiana* в планктонных ассоциациях радиолярий из СЗ Пацифики не всегда приурочены к районам сильной приповерхностной стратификации [45]. Более того, упомянутые выше находки большой численности вида в Японском море могут указывать на слабо стратифицированную по вертикали водную толщу, которая образуется здесь при глубокой конвекции с поверхности [53].

На карте распределения *C. davisiana* в ИКС 2 (рис. 3) концентрации $>20\%$ сосредоточены на севере и северо-западе Северной Пацифики. В [12]

отметили присутствие материала ледового разноса во время последнего оледенения приблизительно в тех же районах, но связали его поступление с потоками айсбергов. Данные о материале ледового разноса в [12] взяты, в том числе, из отчетов по ранним экспедициям глубоководного бурения DSDP, когда еще не было достаточно разработанной технологии детального отбора проб плейстоценовых отложений, и уровень ИКС 2 надежно не устанавливался. Моделирование сезонного распространения морских льдов в МПО [47] показывает вероятное присутствие зимнего ледового покрова только в пределах СЗ круговорота. Еще более ограниченное развитие сезонного льда у Камчатки и в западной части Берингова моря можно предположить по анализу ледовых видов диатомей в колонках донных осадков [2, 52]. Следовательно, мы вряд ли можем утверждать, что многочисленное появление *C. davisiana* в ИКС 2 в субарктической Пацифике обязательно сопровождало обширное распространение морских льдов.

При моделировании палеоокеанологии Тихого океана в МПО показано уменьшение поступления пресной воды в Северную Пацифику [28, 62]. Поверхностная соленость в СЗ круговороте, Охотском и Беринговом морях, а также в Аляскинском заливе могла быть выше, чем сейчас, на 1–1.2 psu (рис. 3), что было достаточно для развития вертикальной конвекции с поверхности до глубины 1000 м [28]. Исходя из изотопных данных по $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$, в [49] также предположили возможность формирования вентилированной палео-ТПВМ в северной части субарктической Пацифики под влиянием холодной соленой поверхностной воды, поступавшей из Берингова моря.

Таким образом, один из выводов нашего анализа распределения *C. davisiana* — подтверждение возможности существования в субарктической Пацифике во время последнего оледенения промежуточной водной массы (палео-ТПВМ), подобной ОПВМ, и сопутствующей вентиляции до промежуточных глубин. Вряд ли мы можем относить этот вывод только к верхней части палео-ТПВМ. Хотя *C. davisiana* в Охотском море и обитает преимущественно в горизонте 200–500 м, в открытых холодноводных районах Мирового океана он обнаруживается в планктоне с глубины не менее 500 м [10], где гидрологические параметры сходны с таковыми ОПВМ.

Другой вывод — дополнение имеющихся взглядов, где именно формировалась вентилируемая палео-ТПВМ в течение ИКС 2. В ряде работ [44, 57], также по данным *C. davisiana*, полагали Берингово море основным исходным районом вентилируемой промежуточной воды. Тем не менее, высокие концентрации *C. davisiana* до 40–50% в слое ИКС 2 были обнаружены в нескольких колонках проекта КОМЕКС из всей акватории Охотского моря [5, 32], что может быть подтверждением важной роли бассейна в вентиляции промежуточной воды. Исходя из анализа распределения *C. davisiana* в осадках максимальной стадии последнего оледенения (рис. 3), можно предположить 4 больших района вентиляции промежуточной воды в течение ИКС 2: Берингово море, Охотское море, СЗ круговорот и, вероятно, Аляскинский залив.

Работа выполнена при частичной поддержке по проектам КОМЕКС, КАЛЬМАР И ИНОПЕКС (КОМЕХ, KALMAR, INOPEX) Федерального министерства Германии по образованию, науке и технологиям (German Federal Ministry for Education, Research and Technology) и по Программе фундаментальных исследований № 23 Президиума Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас океанов, Тихий океан / Под ред. Горшкова С.Г. М.: Изд-во ГУГК при Совете Министров СССР, 1974. 302 карты.
2. Жузе А.П. Стратиграфические и палеогеографические исследования в северо-западной части Тихого океана. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 259 с.
3. Кругликова С.Б. Радиоларии в поверхностном слое осадков Охотского моря // Океанология. 1975. Т. 15. № 1. С. 116–122.
4. Кругликова С.Б. Особенности распределения радиоларий в отложениях бореальной и субтропической зон Тихого океана в плейстоцене // Океанология. 1977. Т. 17. № 6. С. 1055–1063.
5. Матуль А.Г., Абельман А. Четвертичная водная структура Охотского моря по данным радиоларий // Докл. РАН. 2001. Т. 381. № 2. С. 259–261.
6. Матуль А.Г., Горбаренко С.А., Мухина В.В., Лесков В.Ю. Четвертичные микропалеонтологические и литофизические записи осадков из северной части Охотского моря // Океанология. 2003. Т. 43. № 4. С. 583–592.
7. Матуль А.Г., Абельман А., Нюрнберг Д., Тидеман Р. Стратиграфия и крупные изменения палеоокеанологии Охотского моря за последний миллион лет по данным о радиолариях // Океанология. 2009. Т. 49. № 1. С. 101–109.
8. Шастина В.В. Неоген-четвертичные комплексы радиоларий Японского моря (биостратиграфия и палеоокеанология). Автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток: Дальневосточный геологический институт, 1993. 33 с.
9. Abelmann A., Nimmergut A. Radiolarians in the Sea of Okhotsk and their ecological implication for paleoenvironmental reconstructions // Deep-Sea Res. II. 2005. V. 52. P. 2302–2331.
10. Björklund K.R., Ciesielski P.F. Ecology, morphology, stratigraphy, and the paleoceanographic significance of *Cycladophora davisiana davisiana*. Part I: Ecology and morphology // Marine Micropaleontology. 1994. V. 24. P. 71–88.
11. Biebow N., Kulinich R., Baranov B.V. KOMEX II (Kurile Okhotsk Sea Marine Experiment): Cruise report RV Akademik M.A. Lavrentyev cruise 29, leg 1 and leg 2 // GEOMAR Report. 2003. V. 110. 92 p.
12. Bigg G.R., Clark C.D., Hughes A.L.C. A last glacial ice sheet on the Pacific Russian coast and catastrophic change arising from coupled ice-volcanic interaction // Earth and Planetary Science Letters. 2008. V. 265. P. 559–570.
13. Blueford J.R. Distribution of Quaternary radiolaria in the Navarin Basin geologic province, Bering Sea // Deep-Sea Res. 1983. V. 30. P. 763–781.
14. Boltovskoy D., Kling S.A., Takahashi K., Björklund K.R. World atlas of distribution of recent polycystina (Radiolaria) // Palaeontologia Electronica. 2010. Article Number 13.3.18A.
15. Broecker W.S. Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: Will man-made CO₂ upset the current balance? // Science. 1997. V. 278. P. 1582–1588.
16. Conkright M.E., Locarnini R.A., Garcia H.E. et al. World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD, 2002. 17 p.
17. Gorbarenko S.A., Nürnberg D., Derkachev A.N. et al. Magnetostratigraphy and tephrochronology of the Upper Quaternary sediments in the Okhotsk Sea: implication of terrigenous, volcanogenic and biogenic matter supply // Marine Geology. 2002. V. 183. P. 107–129.
18. Gorbarenko S.A., Basov I.A., Chekhovskaya M.P., Southon J. Orbital and millennium scale environmental changes in the southern Bering Sea during last glacial-Holocene: geochemical and paleontological evidences // Deep-Sea Res. II. 2005. V. 52. P. 2174–2185.
19. Gorbarenko S.A., Psheneva O. Yu., Artemova A.V. et al. Paleoenvironment changes in the NW Okhotsk Sea for the last 18 kyr determined with micropaleontological, geochemical, and lithological data // Deep-Sea Res. I. 2010. V. 57. P. 797–811.

20. Hays J.D., Morley J.J. The Sea of Okhotsk: a window on the ice age ocean // *Deep-Sea Res. I.* 2003. V. 50. P. 1481–1506.
21. Hein J.R., Bychkov A.S., Gibbs A.E. Data and results from R.V. Aleksandr Vinogradov cruises 91-av-19/1, North Pacific hydrochemistry transect; 91-av-19/2, North Equatorial Pacific Karin Ridge Fe-Mn crust studies; and 91-av-19/4, Northwest Pacific and Bering Sea sediment geochemistry and paleoceanographic studies. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, Open File Report 94-230, 1994. 292 p.
22. Itaki T. Depth-related radiolarian assemblage in the water-column and surface sediments of the Japan Sea // *Marine Micropaleontology.* 2003. V. 47. P. 253–270.
23. Itaki T., Uchida M., Kim S. et al. Late Pleistocene stratigraphy and palaeoceanographic implications in northern Bering Sea slope sediments: evidence from the radiolarian species *Cycladophora davisiana* // *J. of Quaternary Science.* 2009. V. 24. P. 856–865.
24. Jaccard S., Haug G.H., Sigman D.M. et al. Glacial/interglacial changes in Subarctic North Pacific stratification // *Science.* 2005. V. 308. P. 1003–1006.
25. Hill T.M., Kennett J.P., Pak D.K. et al. Pre-Bolling warming in Santa Barbara Basin, California: Surface and intermediate water records of early deglacial warmth // *Quaternary Science Reviews.* 2006. V. 25. P. 2835–2845.
26. Keigwin L.D. Glacial-age hydrography of the far northwest Pacific Ocean // *Paleoceanography.* 1998. V. 13. P. 323–339.
27. Keigwin L., Jones G., Froelich P. A 15,000 year paleoenvironmental record from Meiji Seamount, far northwestern Pacific // *Earth and Planetary Science Letters.* V. 111. 1992. P. 425–440.
28. Kim S.-J., Park Y.-G. Glacial Ocean Circulation and Property Changes in the North Pacific // *Atmosphere-Ocean.* 2008. V. 46. P. 257–275.
29. Kitani K. An oceanographic study of the Okhotsk Sea: Particularly in regard to cold waters // *Bulletin of the Far Sea Fisheries Research Laboratory.* 1973. V. 9. P. 45–77.
30. Kruglikova S.B. Distribution of Polycystine radiolarians from recent and Pleistocene sediments of the Arctic-Boreal zone // *Berichte zur Polarforschung.* 1999. V. 306. P. 120–131.
31. Ling H.Y. Polycystine Radiolaria and Silicoflagellates from surface sediments of the Sea of Okhotsk // *Bulletin of the Geological Survey of Taiwan.* 1974. V. 24. P. 1–11.
32. Matul A., Abelman A., Khusid T. et al. Late Quaternary changes of the oxygen conditions in the bottom and intermediate waters on the western Kamchatka continental slope, the Sea of Okhotsk // *Deep-Sea Res. II.* 2013. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.03.023i>>.
33. Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D. Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy // *Quaternary Research.* 1987. V. 27. P. 1–30.
34. Max L., Riethdorf J.-R., Tiedemann R. et al. Sea surface temperature variability and sea-ice extent in the subarctic Northwest Pacific during the past 15,000 years // *Paleoceanography.* 2012. V. 27. PA3213, doi: 10.1029/2012PA002292.
35. Morley J.J., Hays J.D. Oceanographic conditions associated with high abundances of the radiolarian *Cycladophora davisiana* // *Earth and Planetary Science Letters.* 1983. V. 66. P. 63–72.
36. Morley J.J., Heusser L.E. Late Quaternary atmospheric and oceanographic variations in the western Pacific inferred from pollen and radiolarian analyses // *Quaternary Science Reviews.* 1989. V. 8. P. 263–276.
37. Morley J.J., Heusser L.E. Role of orbital forcing in east Asian monsoon climates during the last 350 kyr: evidence from terrestrial and marine climate proxies from core RC14-99 // *Paleoceanography.* 1997. V. 12. P. 483–493.
38. Morley J.J., Robinson S.W. Improved method for correlating late Pleistocene/Holocene records from the Bering Sea: application of a biosiliceous/geochemical stratigraphy // *Deep-Sea Res.* 1986. V. 33. P. 1203–1211.
39. Morley J.J., Hays J.D., Robertson J.H. Stratigraphic framework for the late Pleistocene in the northwest Pacific Ocean // *Deep-Sea Res.* 1982. V. 29. P. 1485–1499.
40. Morley J.J., Tiasse V.L., Ashby M.M., Kashgarian M. A high-resolution stratigraphy for Pleistocene sediments from North Pacific Sites 881, 883, and 887 based on abundance variations of the radiolarian *Cycladophora davisiana* // *Proceedings ODP, Scientific Results.* 1995. V. 145. P. 133–140.
41. Nimmergut A., Abelman A. Spatial and seasonal changes of radiolarian standing stocks in the Sea of Okhotsk // *Deep-Sea Res. I.* 2002. V. 49. P. 463–493.
42. Nürnberg D., Tiedemann R. Environmental change in the Sea of Okhotsk during the last 1.1 million years // *Paleoceanography.* 2004. V. 19. PA4011, doi: 10.1029/2004PA001023.
43. Nürnberg D., Dethleff D., Tiedemann R. et al. Okhotsk Sea ice coverage and Kamchatka glaciation over the last 350 ka – Evidence from ice-rafted debris and planktonic $\delta^{18}\text{O}$ // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* 2011. V. 310. P. 191–205.
44. Ohkushi K., Itaki T., Nemoto N. Last glacial-Holocene change in intermediate water ventilation in the northwestern Pacific // *Quaternary Science Reviews.* 2003. V. 22. P. 1477–1484.
45. Okazaki Y., Takahashi K., Itaki T., Kawasaki Y. Comparison of radiolarian vertical distributions in the Okhotsk Sea near the Kuril Islands and in the northwestern North Pacific off Hokkaido Island // *Marine Micropaleontology.* 2004. V. 51. P. 257–284.
46. Okazaki Y., Takahashi K., Katsuki K. et al. Late Quaternary paleoceanographic changes in the southwestern Okhotsk Sea: evidence from geochemical, radiolarian, and diatom records // *Deep-Sea Res. II.* 2005. V. 52. P. 2332–2350.
47. Otto-Bliesner B.L., Brady E.C., Tomas R. et al. Last Glacial Maximum and Holocene Climate in CCSM3 // *J. of Climate.* 2006. V. 19. P. 2526–2544.
48. Pflaumann U., Sarnthein M., Chapman M. et al. Glacial North Atlantic: Sea-surface conditions reconstructed by GLAMAP 2000 // *Paleoceanography.* 2003. V. 18. PA1065, doi:10.1029/2002PA000774.
49. Rella S.F., Tada R., Nagashima K. et al. Abrupt changes of intermediate water properties on the northeastern slope of the Bering Sea during the last glacial and deglacial period // *Paleoceanography.* 2012. V. 27. PA3203, doi: 10.1029/2011PA002205.

50. *Robertson J.H.* Glacial to interglacial oceanographic changes in the Northwest Pacific, including a continuous record of the last 400,000 years. Ph.D. Thesis. Columbia University, New York, 1975. 355 p.
51. *Sachs H.M.* North Pacific radiolarian assemblages and their relationship to oceanographic parameters // *Quaternary Research*. 1973. V. 3. P. 73–88.
52. *Sancetta C.* Effect of Pleistocene glaciation upon oceanographic characteristics of the North Pacific Ocean and Bering Sea // *Deep-Sea Res.* 1983. V. 30. P. 851–869.
53. *Senjyu T., Sudo H.* The upper portion of the Japan Sea Proper Water: Its source and circulation as deduced from isopycnal analysis // *J. of Oceanography*. 1994. V. 50. P. 663–690.
54. *Swift J.H., Aagaard K.* Seasonal transitions and water mass formation in the Iceland and Greenland seas // *Deep-Sea Res.* 1981. V. 28A. P. 1107–1129.
55. *Talley L.D.* An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific // *Deep-Sea Res.* 1991. V. 38. Suppl. 1. P. 171–190.
56. *Talley L.D.* Distribution and formation of North Pacific intermediate water // *Journal of Physical Oceanography*. 1993. V. 23. P. 517–537.
57. *Tanaka S., Takahashi K.* Late Quaternary paleoceanographic changes in the Bering Sea and the western subarctic Pacific based on radiolarian assemblages // *Deep-Sea Res. II*. 2005. V. 52. P. 2131–2149.
58. *Yang J., Honjo S.* Modelling the near-freezing dichothermal layer in the Sea of Okhotsk and its interannual variations // *J. of Geophysical Research*. 1996. V. 101. № C7. P. 16421–16433.
59. *Yasuda I.* The origin of the North Pacific Intermediate Water // *J. of Geophysical Research*. 1997. V. 102. № C1. P. 893–909.
60. *Uda M.* Oceanography of the subarctic Pacific Ocean // *J. of the Fisheries Res. Board of Canada*. 1963. V. 20. P. 119–179.
61. *Ueno H., Yasuda I.* Intermediate water circulation in the North Pacific subarctic and northern subtropical regions // *J. of Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C1. PA3348, doi: 10.1029/2002JC001372.
62. *Wainer I., Goes M., Murphy L.N., Brady E.* Changes in the intermediate water mass formation rates in the global ocean for the Last Glacial Maximum, mid-Holocene and pre-industrial climates // *Paleoceanography*. 2012. V. 27. PA3101, doi: 10.1029/2012PA002290.
63. *Wang R., Chen R.* *Cycladophora davisiana* (Radiolarian) in the Bering Sea during the late Quaternary: A stratigraphic tool and proxy of the glacial Subarctic Pacific Intermediate Water // *Science of China (Series D)*. 2005. V. 48. № 10. P. 1698–1707.
64. *Wang R., Xiao W., Qianyu Li Q., Chen R.* Polycystine radiolarians in surface sediments from the Bering Sea Green Belt area and their ecological implication for paleoenvironmental reconstructions // *Marine Micropaleontology*. 2006. V. 59. P. 135–152.
65. *Warren B.A.* Why is no deep water formed in the North Pacific? // *J. of Marine Res.* 1983. V. 41. P. 327–347.

Late Quaternary Distribution of Radiolarian *Cycladophora davisiana* as Indication of Possible Ventilation of Intermediate Water in the Subarctic Pacific during the Last Glacial

A. G. Matul, A. Abelmann, R. Gersonde, D. Nürnberg, R. Tiedemann, S. B. Kruglikova

A comparison of the micropaleontological data on the abundances of radiolarian species *Cycladophora davisiana* in the bottom surface sediment samples, and sediment cores from the Subarctic Pacific and Far Eastern Seas allowed concluding on the possible last glacial paleoenvironments related to the intermediate water properties and distribution. *C. davisiana* as modern microfaunal indicator of the cold well-oxygenated water marks areas of the active ventilation on the intermediate depths which occurs now in the Sea of Okhotsk. Findings of the high abundances of *C. davisiana* in the last glacial sediments may exhibit the formation and distribution of the ventilated intermediate water during the maximum stage of the last glaciation over the most Subarctic Pacific: in the Bering Sea, Sea of Okhotsk, North-West Gyre, and Alaskan Bay.