

УДК 551.465

ИЗМЕНЕНИЯ ПАЛЕОГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ В ГОЛОЦЕНЕ ПО МАТЕРИАЛАМ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНЫХ ПАЛИНОМОРФ

© 2006 г. Т. С. Клювиткина¹, Х. А. Баух²¹Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия²Академия Наук Майнц, факультет гуманитарных наук и литературы, Киль, Германия

Поступила в редакцию 09.11.2005 г., после доработки 24.05.2006 г.

На основе изучения комплексов водных палиноморф в голоценовых осадках двух колонок, полученных из восточного шельфа моря Лаптевых, реконструированы основные этапы послеледниковой трансгрессии за последние 11.3 тыс. лет. В это время внешний шельф моря Лаптевых (глубина 51 м) уже был затоплен, но в период времени 11.3–10.3 тыс. лет находился в области значительной пресноводной аккумуляции в условиях непосредственной близости речного устья. На 1–1.5 тыс. лет позднее был затоплен внутренний шельф (глубина 32 м), но оставался под влиянием речного стока до 7.4 тыс. л.н. Временной интервал 10.3–7.4 тыс. л.н характеризуется преобладанием в составе водных палиноморф цист динофлагеллат *Operculodinium centrocarpum*, появлением более теплолюбивых видов диноцист и повышением значений АН-критерия, что говорит об увеличении поступления на шельф моря Лаптевых относительно теплых североатлантических вод. Условия, близкие к современным, установились на внешнем шельфе моря Лаптевых примерно 8.6 тыс. л.н, на внутреннем – около 7.4 тыс. л.н.

1. ВВЕДЕНИЕ

Море Лаптевых, расположенное в центральной части Евразийского сектора Арктики (рис. 1), играет ключевую роль в формировании ледо-гидрологического режима Северного Ледовитого океана благодаря обильному речному стоку в летний период и формированию льдов в пределах полыньи зимой [12]. Летом на шельф моря Лаптевых ежегодно поступает около четверти суммарного пресноводного стока в Арктический океан, главным образом, за счет стока р. Лена [23, 24]. Эти пресные воды, распределяющиеся в поверхностном слое вод Северного Ледовитого океана, в значительной степени обеспечивают стабильность стратификации его приповерхностных вод [3]. Кроме того, полынья моря Лаптевых, составляющая 1/3 часть Великой Сибирской полыньи, является одним из основных источников морских льдов в Арктике в зимний период, которые включаются в трансполярный дрейф льдов [4, 44]. Таким образом, изучение современных и палеогидрологических процессов в море Лаптевых имеет важное значение для понимания процессов формирования водных масс и их эволюции в Северном Ледовитом океане.

Конец позднего плейстоцена ознаменовался значительным понижением уровня Северного Ледовитого океана [9]. Обширные пространства шельфа моря Лаптевых в максимум регрессии представляли собой арктическую лессово-ледовую равнину, которую пересекали палеорула

рек Лена, Яна, Оленек, Анабар, Хатанга [26, 31]. Ход постгляциальной трансгрессии и некоторые особенности изменений седиментационных процессов в пределах моря Лаптевых к настоящему времени достаточно хорошо изучены, главным образом, благодаря комплексному исследованию колонок донных осадков и их детальному радиоуглеродному датированию [15]. Вместе с тем, данные о региональных и временных изменениях палеогидрологических параметров, таких как соленость поверхностных и придонных вод, ледовые условия, речной сток, распределение водных масс в процессе миграции к югу береговой линии еще немногочисленны [15, 46, 48].

В последние годы в практике реконструкций палеогидрологических обстановок в шельфовых морях Арктики все большее значение приобретает изучение водных палиноморф, которые включают в себя, в первую очередь, цисты морских видов динофлагеллат и пресноводные зеленые водоросли, а также акритархи, органическую часть скелета фораминифер и другие органические остатки водных микроорганизмов [33, 34, 35, 39, 40]. Выявленная связь видового и количественного распределения водных палиноморф в поверхностных осадках арктических морей с гидрологическими параметрами позволяет успешно использовать их для палеоокеанологических реконструкций [19, 20, 38, 40, 41]. Представленные в настоящей статье материалы исследований водных палиноморф в детально датированных колонках донных осад-

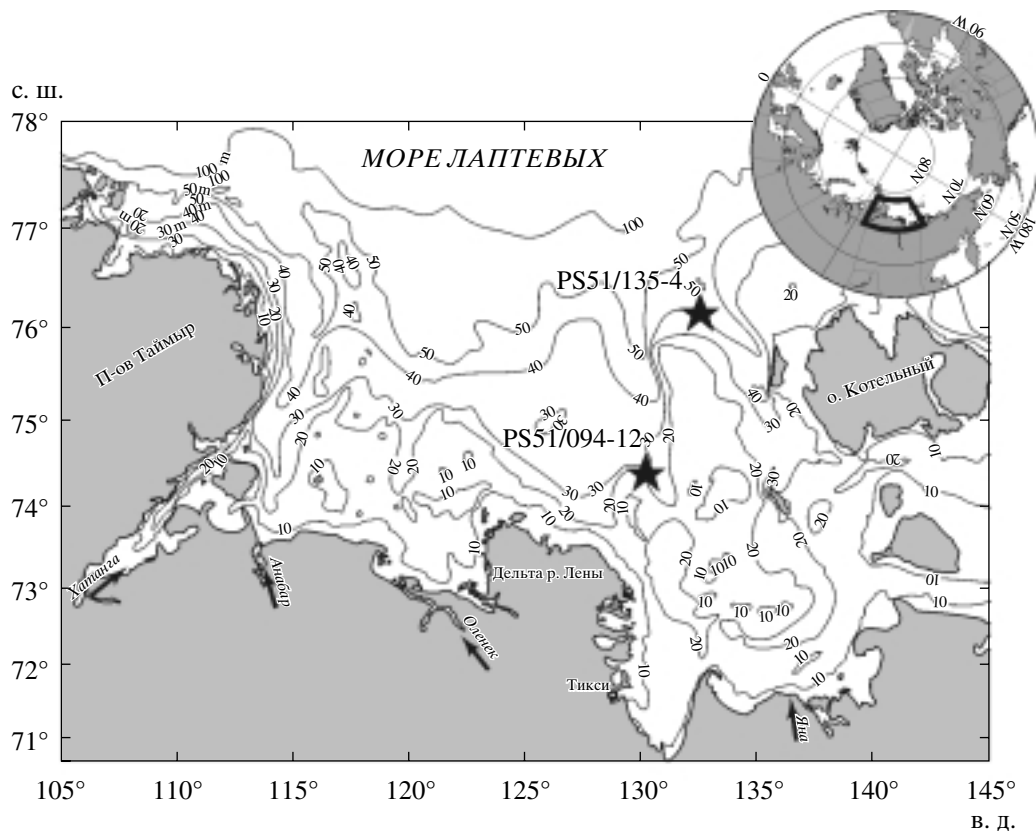


Рис. 1. Местоположение исследованных колонок PS51/135-4 и PS51/092-12 в море Лаптевых.

ков из юго-восточной части моря Лаптевых являются одной из первых реконструкций постгляциальных палеообстановок в арктических морях Евразии за последние 11 тыс. лет с использованием водных палиноморф.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованные колонки донных осадков PS51/135-4 (76°10' с.ш., 133°15' в.д., глубина моря 51 м) и PS51/092-12 (74°36' с.ш., 130°09' в.д., глубина моря 32 м) были получены в восточной части шельфа моря Лаптевых в ходе российско-германской экспедиции TRANSDRIFT V в августе 1998 г. на научно-исследовательском судне Полярштерн [30], в пределах подводных долин рек Яны и Лены, соответственно (рис. 1). Колонка PS51/135-4 длиной около 5 м охватывает, согласно детальному радиоуглеродному датированию, временной интервал 11.3–5.3 тыс. л.н. Длина колонки PS51/092-12 составляет около 6 м и соответствует последним 9 тыс. лет. Преобразование полученных радиоуглеродных датировок в календарный возраст было проведено на основе установленного резервуарного эффекта с помощью программы CALIB 4.3 [15, 54].

Образцы из колонок отбирались с интервалом 10 см. Для целей исследования водных палиноморф применялся стандартный палинологический метод [35], в соответствии с которым растворение карбонатов и кремне содержащих частиц проводилось с использованием соляной (HCl) и фтороводородной (HF) кислот [13]. Для удаления из образцов пелитовых частиц, препараты были профильтрованы через фильтры с диаметром пор 7–10 мкм. Определение концентраций водных палиноморф в осадках проводилось методом добавления в препараты фиксированного количества спор *Lycopodium clavatum* [53]. Исследование водных палиноморф в образцах и подсчет их количественного содержания производился на световом микроскопе Neovar 2, при увеличении 400× и 1000×. В каждом образце было идентифицировано как минимум 100 цист динофлагеллат.

Для реконструкций изменений поступления на шельф моря Лаптевых пресных вод использовался CD-критерий – соотношение содержания в осадках пресноводных зеленых водорослей, которые приносятся на шельф с речными водами, и морских цист динофлагеллат.

Установленная корреляция между содержанием в поверхностных осадках арктических морей цист гетеротрофных видов динофлагеллат и про-

должительностью ледового покрова [17, 40] позволяет использовать для палеореконструкций АН-критерий – отношение содержания цист автотрофных видов динофлагеллат (видов порядка *Gonyaulacales*, а также цист *Pentapharsodinium dalei*) к гетеротрофным видам. АН-критерий (или GP-критерий, [17, 40]) может быть использован для реконструкций палеопродуктивности [17, 40], продолжительности ледового покрова [40], а также служить индикатором поступления северо-атлантических вод в арктические моря [42].

3. ОРОГРАФИЯ И ПОСТГЛЯЦИАЛЬНАЯ СЕДИМЕНТАЦИЯ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И СОВРЕМЕННЫЕ ЛЕДОВО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Орография и постгляциальная седиментация. Море Лаптевых, расположенное в центральной части Евразийского шельфа Арктики, представляет собой мелководный окраинный бассейн, 72% которого занимает наклоненная к северу морская равнина с глубинами около 50 м, ширина которой составляет около 300 км на западе и достигает более чем 500 км на востоке [2, 27, 56]. Область материкового склона начинается примерно на параллели 77° с.ш. и характеризуется весьма резким увеличением глубины до 1000 м и более. Материковый склон моря Лаптевых на всем протяжении широкий. Местами он имеет ступенчатый профиль, на многих участках представлен наклонными аккумулятивными равнинами. На материковом склоне выделяются несколько каньонов, приуроченных к устьям крупных подводных долин [10].

Согласно новейшим данным и палеогеографическим реконструкциям шельф моря Лаптевых в позднем плейстоцене находился вне зоны распространения ледниковых покровов [9, 55], и в период максимума последнего оледенения на шельфе моря Лаптевых преобладали процессы субаэрального осадконакопления и формирования многолетнемерзлых толщ в условиях криоаридного климата [9, 51, 52]. Во время постгляциального повышения уровня моря максимальные скорости осадконакопления, обусловленные катастрофически быстрым разрушением толщ многолетнемерзлых пород и аккумуляцией речной взвеси, установлены в пределах погребенных палеодолин крупнейших рек, дренирующих шельф моря Лаптевых (Лены, Яны, Хатанги), а также на субмеридионально ориентированных их продолжениях на континентальном склоне (см. рис. 1) [14, 31, 32, 43].

Ледово-гидрологические условия. Современная гидрологическая ситуация на шельфе моря Лаптевых определяется, главным образом, поступлением арктических водных масс с севера и речных вод с юга [23, 28]. Около 70% ежегодного стока пресных вод поступает в море Лаптевых в

результате стока р. Лена, причем основной сток в настоящее время направлен к востоку и северо-востоку, что определяет высокие градиенты солености вод в юго-восточной части моря [21]. Температура поверхностных вод в море изменяется от 8–10°C у побережья до –1.5°C в северо-восточной части моря [21, 22, 23].

Атлантические водные массы относятся к ключевым климатообразующим факторам северной полярной области, роль которых сводится к переносу тепла и солей из умеренных широт в полярные. В море Лаптевых атлантические воды оказывают постоянное тепляющее влияние на глубинах более 100 м [22], а их проникновение на шельф зависит от атмосферной циркуляции и реверсивных придонных течений [22, 49].

Море Лаптевых покрыто льдом в течение 9–10 месяцев в году. Зимняя полынья моря Лаптевых, разделяющая припай и паковый лед, является одним из основных источников морского льда Арктики [1, 4, 5, 44].

4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АССОЦИАЦИЙ ВОДНЫХ ПАЛИНОМОРФ В ОСАДКАХ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Водные палиноморфы в поверхностных осадках моря Лаптевых. Согласно результатам предшествующих исследований, установленные в поверхностных осадках моря Лаптевых водные палиноморфы включают цисты динофлагеллат, зеленые водоросли, акритархи, а также органические остатки различных видов зоопланктона [33, 34, 39, 40]. Среди водных палиноморф как по видовому составу, так и по численности доминируют цисты морских видов динофлагеллат, являющихся наряду с диатомеями ведущей группой фитопланктона в арктических морях [8]. Несмотря на то, что лишь 1/5 часть видов динофлагеллат образует цисты, сохраняющиеся в осадках [8], выявлена высокая информативность диноцист для биостратиграфических исследований и реконструкций различных параметров водных масс, таких как температура, соленость поверхностных вод, продолжительность ледового покрова [20, 41]. В качестве индикаторов речного стока и интенсивности его поступления на шельф и континентальный склон арктических морей используются пресноводные зеленые водоросли, а также их количественное соотношение с цистами динофлагеллат [39].

Концентрации диноцист в исследованных поверхностных осадках моря Лаптевых варьируют от 3 до 4000 цист на грамм сухого осадка, а зеленых водорослей – от 7 до 3800 соответственно [34, 35]. Благодаря притоку пресных вод количество цист динофлагеллат в прибрежных районах моря Лаптевых, находящихся под влиянием стока рек

Лена и Яна, сравнительно невелико, в то время как преобладающее значение имеют зеленые водоросли. В северной, наиболее удаленной от устьев рек части моря Лаптевых в поверхностных осадках преобладают цисты динофлагеллат, а количество пресноводных водорослей резко сокращается [34].

Сообщество зеленых водорослей представлено родом *Pediastrum* и *Botryococcus* cf. *braunii*, характерными для рек Сибири. Эти виды пресноводные, следовательно, их появление в морских осадках свидетельствует о поступлении речных вод [33].

В море Лаптевых установлены три основных типа комплексов цист динофлагеллат [33]. Их различия обусловлены, главным образом, градиентами солености и температуры. Сообщество диноцист внутреннего шельфа характеризуется преобладанием *Islandinium minutum* и *Islandinium? cesare* s.l. Эти виды адаптированы к условиям низкой солености поверхностных вод и характерны для полярных и субполярных широт северного и южного полушарий. Их высокое процентное содержание в осадках (35% и более) характерно для районов с продолжительным ледовым покровом (более 9–10 месяцев в году) и летними температурами, редко превышающими 7°C [20, 34, 35, 50]. Для северо-восточной части внешнего шельфа моря Лаптевых характерно преобладание *Brigantedinium* spp., – вида, который может существовать в относительно широком диапазоне температуры и солености поверхностных вод. Эта циста принадлежит планктонным видам динофлагеллат рода *Protoperidinium*. Известно, что виды этого рода являются гетеротрофами, и основным источником их питания являются диатомовые водоросли рода *Chaetoceros*, виды которого часто доминируют в планктоне арктических морей [29]. Ареал высокой численности диноцист *Brigantedinium* spp. примерно совпадает с ареалом распространения *Chaetoceros* [18]. Сообщество континентального склона характеризуется наличием видов североатлантического происхождения *Operculodinium centrocarpum* и *Nematosphaeropsis labyrinthus* [33]. Несмотря на то, что *Operculodinium centrocarpum* в настоящее время встречается в поверхностных осадках полярных регионов, максимального обилия этот вид достигает в умеренной зоне, на северо-востоке Атлантики и Норвежском море [38, 50]. Это говорит о том, что его появление в арктических морях вызвано притоком атлантических вод, которые поднимаются вверх по континентальному склону и распределяются в пределах шельфа.

Распределение в осадках моря Лаптевых цист *Polykrikos* sp. (здесь и далее – арктический тип [20]) ограничено относительно низкими значениями температуры и солености, от –1.3° до 2.2° и от

17 до 26‰, соответственно. Этот вид, возможно, является эндемиком арктического региона [33]. Современное распределение цист вида *Pentaparthodinium dalei* ограничено субарктическими условиями [25, 20]. В поверхностных осадках моря Лаптевых этот вид был отмечен лишь в нескольких образцах, и его содержание не превышало 4.9% [35].

Данные по географическому распространению современных цист динофлагеллат и выявленная их связь с гидрологическими параметрами были положены нами в основу палеогеографических реконструкций при исследовании голоценовых осадков моря Лаптевых.

Водные палиноморфы в колонках донных осадков моря Лаптевых. Водные палиноморфы были изучены нами в двух колонках, полученных в юго-восточных районах моря Лаптевых в пределах погребенных палеодолин рек Лена и Яна (см. рис. 1), где установлены высокие скорости осадконакопления в голоцене [14, 43], что позволило нам осуществить детальные палеорекострукции.

Палиноморфы в осадках колонки PS51/135-4. Осадки колонки PS51/135-4 характеризуются преобладанием цист динофлагеллат и зеленых водорослей в составе водных палиноморф. Также отмечены акритархи и органические части скелетов фораминифер. Концентрация диноцист в осадках колонки в целом возрастает вверх по глубине от менее чем 25 цист/г в ее нижней части до 2500 цист/г в верхней части колонки (рис. 2). С целью реконструкции изменений речного стока мы использовали соотношение между морскими цистами динофлагеллат и пресноводными зелеными водорослями (CD-критерий). Пресноводные водоросли в осадках колонки PS51/135-4 представлены видами *Pediastrum* spp., *Botryococcus* cf. *Braunii*. Максимальные концентрации зеленых водорослей (до 3000 водорослей/г) отмечены в нижней части колонки (>420 см), что соответствует календарному возрасту 11.3–10.3 тыс. л.н. Также небольшой пик содержания зеленых водорослей в осадках колонки зафиксирован на глубине около 80 см (8.5–7.0 тыс. л.н). CD-критерий в целом не превышает 0.5, увеличиваясь на глубине 80 см (до 0.9), и достигает максимальных значений (до 20) в нижней части колонки (11.2–10.3 тыс. л.н).

Сообщество диноцист в осадках колонки состоит из 14 видов или видовых групп динофлагеллат, причем максимального количества достигают виды *Islandinium minutum*, *Brigantedinium simplex* и *Operculodinium centrocarpum*. В большинстве образцов преобладает *Islandinium minutum* (до 80%), что характерно для сообществ диноцист арктического шельфа, включая районы полярных [33, 40]. Содержание в осадках колонки видов *Islandinium? cesare* s.l. и *Echinidinium karaense* не превышает 20–30%. Относительное содержание вида *Brig-*

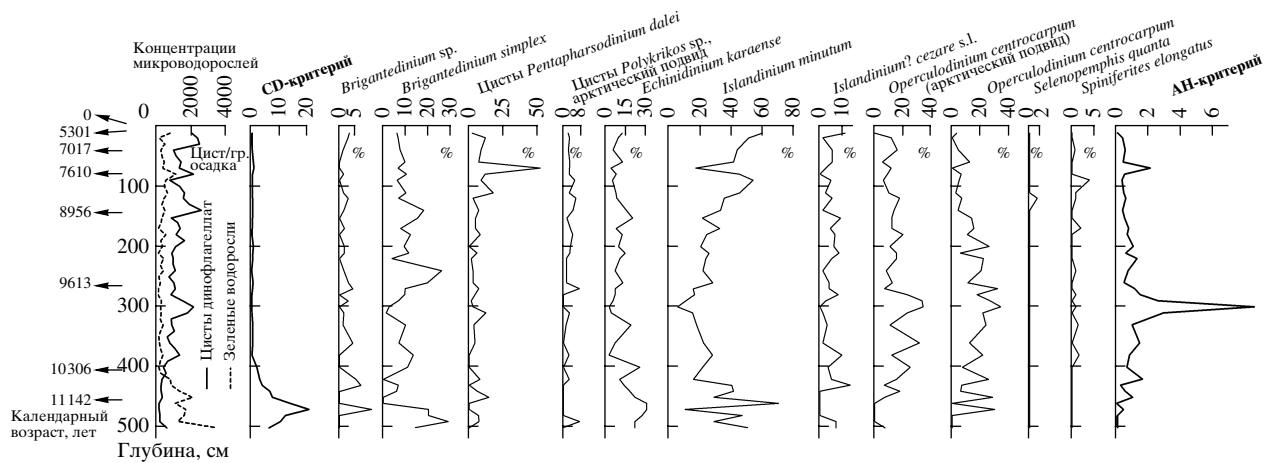


Рис. 2. Распределение водных палиноморф в осадках колонки PS51/135-4.

antedinium simplex в целом постоянно по глубине колонки и составляет примерно 10–30%, а *Brigantedinium sp.* не превышает 5%. Цисты эндемичного арктического вида *Polykrikos sp.* встречаются практически по всей колонке, кроме нижней ее части, однако относительное содержание этого вида не превышает 7%.

Вид – индикатор североатлантических вод *Operculodinium centrocarpum* и его морфологические разновидности отмечены по всей длине колонки. Максимальное относительное содержание этого вида (>30%) приходится на среднюю и нижнюю части колонки, соответствующие возрасту от 11.3 до 9.0 тыс. л.н, а его подвид *O. centrocarpum*-арктический присутствует в средней части колонки и достигает максимальных значений в интервале времени 10.3–9.2 тыс. л.н. Максимальное содержание в осадках колонки относительно тепловодного вида *Spiniferites elongatus* (8%) относится к временному интервалу 7.5–10.3 тыс. лет. Распределение цист *Pentaparsodinium dalei* в осадках колонки неравномерно: в нижней части этот вид отсутствует, в средней части (10.3–8.6 тыс. л.н) его содержание не превышает 10%, а в верхней (примерно 7.5 тыс. л.н) резко возрастает до 52%.

АН-критерий, указывающий на продолжительность ледового покрова, глубину проникновения света и уровень первичной продуктивности в высоких широтах, может также служить дополнительным индикатором поступления атлантических вод на шельфы арктических морей, так как преобладающими в них являются автотрофные виды [40, 42]. В осадках колонки АН-критерий не превышает 0.5 в верхней и нижней ее частях, однако в средней части, соответствующей интервалу времени 10.3–9.2 тыс. л.н, составляет 1–2, а на глубине 300 см (9.8 тыс. л.н) скачкообразно возрастает до 8.5 (рис. 2).

Таким образом, на основе изменения количественного и видового состава водных палиноморф в осадках колонки PS51/135-4 можно выделить три основные группировки, соответствующие различным палеогидрологическим условиям осадконакопления: на глубинах 500–400 см (11.3–10.3 тыс. л.н) в составе водных палиноморф доминировали пресноводные водоросли, сообщество диноцист характеризовалось низким видовым разнообразием и преобладанием эвригаллиных холодноводных видов; интервал 400–190 см (10.3–9.2 тыс. л.н) был отмечен преобладанием диноцист в составе водных палиноморф и высоким относительным содержанием автотрофных видов и видов-индикаторов притока североатлантических вод в ассоциациях цист динофлагеллат; на глубинах 130 см и выше (8.6 тыс. л.н) ассоциации водных палиноморф по количественному и видовому составу близки к современным ассоциациям внешнего шельфа восточной части моря Лаптевых.

Палиноморфы в осадках колонки PS51/092-12. В осадках данной колонки обнаружен комплекс водных палиноморф, включающий в себя цисты динофлагеллат, зеленые водоросли, акритархи и некоторые виды зоопланктона. В общем составе водных палиноморф доминируют диноцисты и зеленые водоросли. Концентрации цист динофлагеллат изменяются от 900 до 5700 цист/г сухого осадка (рис. 3), при максимальных значениях, установленных в средней и верхней частях колонки на глубинах менее 330 см, соответствующих последним 7.4 тыс. л.н, и минимальных концентрациях в нижней части колонки на глубинах 570–330 см (8.9–7.4 тыс. л.н). Содержание зеленых водорослей, представленных видами *Pediastrum kawraiskii*, *P. boryanum* и *Botryococcus cf. Braunii* варьирует в пределах от 70 до 3700 экз/г, и их наибольшие концентрации установлены в нижней части колонки (7.4 тыс. л.н и ранее). CD-критерий имеет максимальные значения (до 3.5) в нижней

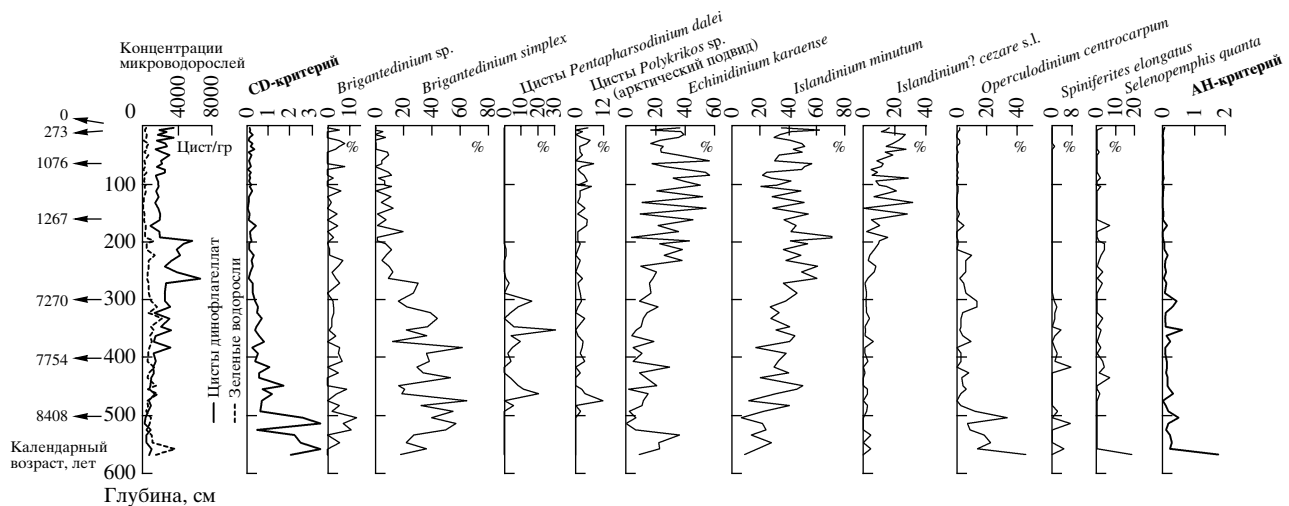


Рис. 3. Распределение водных палиноморф в осадках колонки PS51/092-12.

части колонки на глубинах 570–500 см и, после скачкообразного уменьшения значений на уровне 500 см, постепенно сокращается вверх по разрезу колонки до 330 см, что отражает снижение влияния речного стока в районе исследований в ходе развития голоценовой трансгрессии. На глубинах менее 330 см значения CD-критерия остаются неизменными и не превышают 0.2.

Цисты динофлагеллат в осадках данной колонки представлены 10 видами и видовыми группами, в составе которых доминируют *Islandinium minutum*, *Echinidinium karaense* и *Brigantedinium simplex*. Процентное содержание эвригалинного вида *Islandinium minutum* характеризуется постепенным увеличением вверх по колонке (от 7 до 70% и более). Аналогично распределение в осадках колонки и близкого по экологии и географическому распространению вида *Echinidinium karaense*, максимальные значения содержания которого в ассоциациях диноцист (до 60%) установлены в верхних 330 см колонки (7.4–0 тыс. л.н). Содержание *Islandinium? cezare* s.l. в нижней и средней частях колонки (570–260 см) не превышает 5%, а в верхней ее части возрастает до 31%. Распределение *Brigantedinium simplex* в осадках колонки имеет противоположную направленность: его процентное содержание в ассоциациях диноцист достигает максимальных значений (50%) в нижней части колонки (возраст >7.4 тыс. л.н) и постепенно снижается (до 5% и менее) вверх по колонке. Содержание цист холодноводного вида *Polykrikos* sp. в осадках не превышает 10% и распределено относительно равномерно в средней и верхней частях колонки. В нижней части колонки, соответствующей времени 8.8–8.3 тыс. л.н, цисты *Polykrikos* sp. отсутствуют.

Относительное содержание *Operculodinium centrocarpum*, индикатора интенсивности поступления на шельф моря Лаптевых североатланти-

ческих вод, изменяется от 0 до 45%. При этом, его максимальное процентное содержание (до 50%) установлено в интервале осадков 570–480 см (8.9–8.3 тыс. л.н). В средней части колонки (480–330 см, 8.3–7.4 тыс. л.н) его содержание в составе ассоциаций диноцист составляет около 10%, а в верхней части не превышает 2%. Интервал глубин 570–330 см (8.9–7.4 тыс. л.н) характеризуется также появлением относительно тепловодного вида *Spiniferites elongatus* (до 8%). Цисты североатлантического вида *Pentapharsodinium dalei* встречаются в средней части колонки на глубине 490–290 см, что соответствует временному интервалу 6.0–8.4 тыс. л.н, и достигают 30% в составе ассоциаций около 7.5 тыс. л.н.

АН-критерий ассоциаций диноцист колонки PS51/092-12 не превышает 0.2 в верхней и средней частях колонки, а в нижней достигает максимальных значений (до 1.75) в интервале глубин 570–330 см (8.9–7.4 тыс. лет), что свидетельствует об увеличении поступления на внутренний шельф моря Лаптевых североатлантических вод, либо об изменениях в распределении водных масс на шельфе моря Лаптевых (рис. 3).

Таким образом, в осадках колонки PS51/092-12 можно выделить несколько ассоциаций водных палиноморф, сменяющих друг друга вверх по колонке и отражающих основные этапы осадконакопления на внутреннем шельфе моря Лаптевых: для короткого интервала глубин 570–546 см, соответствующего времени 8.8–8.6 тыс. л.н, характерно сообщество палиноморф, типичное для внутренней зоны маргинального фильтра р. Лены – области лавинообразного накопления взвешенных речных наносов [7]. Об этом свидетельствуют всплеск концентраций пресноводных зеленых водорослей и высокие значения CD-критерия. Интервал 570–330 см (8.9–7.4 тыс. л.н) отмечен высоким содержанием автотрофных ви-

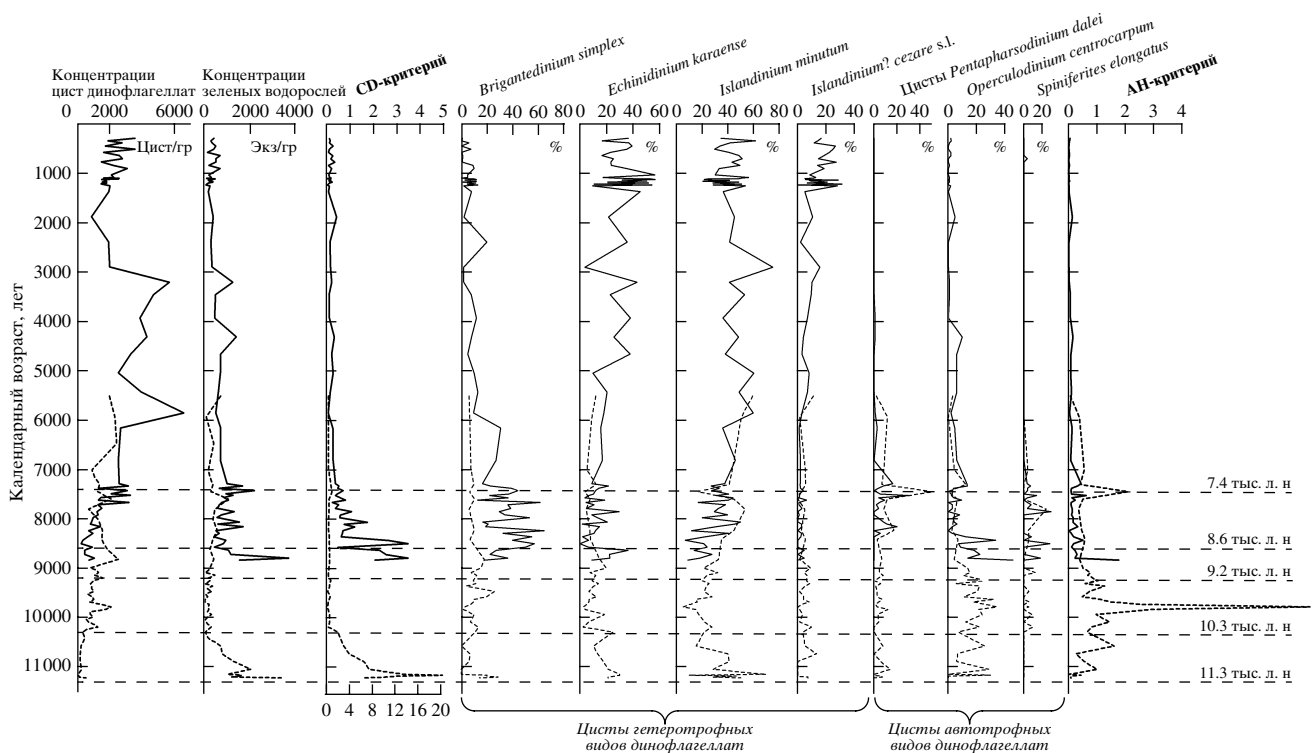


Рис. 4. Палеогеографические события голоцена на внешнем (пунктирная линия) и внутреннем (сплошная линия) шельфе моря Лаптевых по данным анализа водных палиноморф.

дов, видов-индикаторов притока североатлантических вод, а также присутствием относительно тепловодных видов. Ассоциация водных палиноморф в этом интервале глубин сформирована при участии атлантических вод, а также при значительном опресняющем влиянии стока палео-Лены. Интервал глубин 330–0 см (7.4–0 тыс. л.н) характеризуется близкими к современным ассоциациями водных палиноморф.

5. ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ В ГОЛОЦЕНЕ

Современное распределение водных палиноморф в поверхностных осадках восточного шельфа моря Лаптевых прекрасно отражает гидрологические обстановки в этом регионе, являясь индикатором продолжительности ледового покрова, солености, температуры поверхностных вод, а также характера взаимодействия арктических водных масс, атлантических вод и поступающих на шельф с юга пресных вод рек Лены и Яны [33, 34, 39]. Таким образом, распределение водных палиноморф в голоценовых осадках PS51/135-4 и PS51/092-12 может свидетельствовать об изменении этих параметров за последние 11.3 тыс. лет.

Как установлено в последние годы, в период максимума последнего оледенения мелководный

шельф моря Лаптевых был полностью осушен, и на его поверхности происходило формирование лессово-ледового комплекса в условиях криоаридного климата [9, 51, 52]. Постгляциальная трансгрессия определила главные пространственно-временные особенности гидрологических и седиментационных условий на шельфе. Внешний шельф моря Лаптевых (глубина моря 51 м, колонка PS51/135-4) был затоплен около 11.3 тыс. л.н [6, 15, 47], о чем свидетельствует наличие в осадках на этом временном интервале морских видов диноцист (рис. 4). Однако согласно крайне высокому значению CD-критерия (до 20) до 10.3 тыс. л.н данный район находился под непосредственным влиянием стока р. Яна, а всплеск концентраций зеленых водорослей на этом временном интервале однозначно указывает на наличие здесь внутренней зоны маргинального фильтра – области лавинной седиментации р. Яны [7].

На внутреннем шельфе (глубина моря 32 м, колонка PS51/092-12) присутствие в осадках, соответствующих временному интервалу 8.9–7.4 тыс. л.н, цист морских видов динофлагеллат говорит о том, что уже около 8.9 тыс. л.н уровень моря находился, примерно, на положении палеоизобаты 32 м, что подтверждается результатами предшествующих исследований диатомовых водорослей и геохимическими данными [16, 43]. Повышенные значения CD-критерия на временном отрезке

8.9–7.4 тыс. л.н (рис. 4) позволяют заключить, что в этот период времени место взятия колонки все еще находилось под непосредственным влиянием речного стока в период низкого стояния уровня моря. Область лавинообразного осаждения речной взвеси в условиях маргинального фильтра р. Лены устанавливается здесь 8.8–8.6 тыс. л.н по высоким значениям CD-критерия (рис. 4) и концентраций зеленых водорослей (рис. 3). Условия палеоэстуария как на внешнем шельфе (11.3–10.3 тыс. л.н), так и на внутреннем (8.9–7.4 тыс. л.н), подтверждаются также преобладанием в ассоциациях соответствующих колонок эвригалинных видов диноцист, способных выдерживать пониженную соленость прибрежных вод, таких как *Islandinium minutum*, *Echinidinium karaense* и *Brigantedinium simplex*.

По нашим данным, с 11.3 тыс. лет на гидрологические условия восточной части шельфа моря Лаптевых оказывают влияние североатлантические воды, которые и в настоящее время поступают на шельфы арктических морей вдоль континентальной окраины. Наличие в осадках исследованных колонок вида *Operculodinium centrocarpum*, а также цист *Pentapharsodinium dalei* свидетельствует о том, что приток атлантических вод постоянно оказывал влияние на шельф моря Лаптевых, но происходило это с различной интенсивностью. Временной интервал 10.3–9.2 тыс. л.н на внешнем шельфе моря Лаптевых (колонка PS51/135-4) характеризуется повышенным содержанием *Operculodinium centrocarpum*. На внутреннем шельфе (колонка PS51/092-12) также отмечено возрастание относительного содержания этого вида в нижней части колонки (8.3 тыс. л.н и ранее). В осадках нижней части колонки PS51/092-12 на глубине, соответствующей возрасту около 8.4 тыс. лет, также были найдены планктонные фораминиферы, а также бентосные фораминиферы *Cassidulina teretis*, которые служат индикаторами атлантических вод [11]. Таким образом, можно заключить, что в раннем голоцене североатлантические воды оказывали значительное влияние на формирование водных масс на шельфе моря Лаптевых. После 8.0 тыс. л.н происходит снижение адвекции атлантических вод, а около 7.0 тыс. л.н устанавливается их поступление, близкое современному уровню (рис. 4).

Следует заметить, что повышенному содержанию вида *Operculodinium centrocarpum* 10.3–9.2 тыс. л.н может быть также и другое объяснение. Атлантические воды в настоящее время поступают в Арктический океан в виде глубинного течения вдоль континентальной окраины Евразии, затем поднимаются по континентальному склону и распределяются в пределах шельфовых морей. Однако в упомянутый промежуток времени уровень моря Лаптевых был существенно ниже современного и находился на отметках примерно –30 м [15]. Следовательно, площадь шельфа была невелика, и распределение видов диноцист, отражающих поступление атлантических вод, могло быть вызвано гидрологическими условиями, существенно отличными от современных [47].

Интересно также, что цисты *Pentapharsodinium dalei* имеют сходное распределение в осадках обеих колонок, а пик их относительного содержания, как на внутреннем, так и на внешнем шельфе приходится на 7.5 тыс. л.н (рис. 4). Этот вид широко распространен в современных осадках Норвежского моря, шельфа Исландии, а также Баренцева моря [25]. *Pentapharsodinium dalei* обычно относят к субполярно-умеренным видам [20, 37, 50]. В современных осадках моря Лаптевых цисты *Pentapharsodinium dalei* были обнаружены лишь в нескольких образцах, и их содержание не превышает 4.9% [33]. Следовательно, присутствие цист этого вида в голоценовых осадках моря Лаптевых говорит о значительных отличиях палеоокеанологических обстановок того времени от современных.

Распределение видов *Islandinium minutum*, *I. ? cezare* s.l. и *Echinidinium karaense* в осадках колонок PS51/135-4 и PS51/092-12 отражает постепенное установление современных морских условий в процессе миграции к югу береговой линии моря Лаптевых. Эти виды типичны для современных осадков шельфа моря Лаптевых [33], характеризуют холодные воды полярных широт и достигают максимального количества в регионах с продолжительным ледовым покровом. На внешнем шельфе (колонка PS51/135-4) *Islandinium minutum* доминирует 11.3–10.3 тыс. л.н, возможно, за счет своей устойчивости к условиям низкой солености прибрежных вод в этот период. В интервале 10.3–9.2 тыс. л.н отмечается значительное снижение содержания этого вида, а, начиная примерно с 9.2 тыс. лет, происходит постепенное увеличение его относительного содержания вплоть до современного уровня.

Период времени 10.3–9.2 тыс. лет на внешнем шельфе (колонка PS51/135-4), характеризовался, возможно, небольшим относительным повышением температуры поверхностных вод, о чем свидетельствует относительно низкое содержание *Islandinium minutum* на этом интервале, присутствие в осадках относительно теплолюбивого вида *Spiniferites elongatus*, а также повышенные значения АН-критерия (рис. 4). Относительно теплый период прослеживается также и на внутреннем шельфе моря Лаптевых в интервале времени 8.9–7.4 тыс. л.н (колонка PS51/092-12), что устанавливается по повышенным значениям АН-критерия, присутствию *Spiniferites elongatus*, низкому содержанию холодноводных видов *Islandinium minutum* и *Echinidinium karaense*, а также присутствию цист *Pentapharsodinium dalei* (рис. 4). Это подтверждается также нашими данными по со-

держанию водных палиноморф в колонках донных осадков из северо-западной части моря Лаптевых, где также выделяется период с более мягкими климатическими условиями примерно 10.8–7.0 тыс. л.н. Повышенные значения АН-критерия и высокое процентное содержание *Operculodinium centrocarpum* 8.9–7.4 тыс. л.н на внутреннем шельфе моря Лаптевых (колонка PS51/092-12) и 10.3–9.2 тыс. л.н на внешнем шельфе (колонка PS51/135-4) свидетельствует о значительном увеличении притока североатлантических вод в море Лаптевых в течение этих отрезков времени.

Представленные реконструкции палеогидрологических обстановок в целом согласуются с данными диатомового [16] и спорово-пыльцевого [36, 45] анализов, указывающих на относительно более теплые климатические условия на побережье моря Лаптевых 9–4 тыс. л.н.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных нами исследований водных палиноморф в голоценовых осадках восточной части шельфа моря Лаптевых установлена последовательная смена палеообстановок в ходе постледникового подъема уровня моря. Выделены следующие основные палеогидрологические события за последние 11.3 тыс. лет (рис. 4):

1. В интервале времени 11.3–10.3 тыс. л.н в пределах палеоэстуария р. Яна на внешнем шельфе моря Лаптевых (глубина 51 м) в условиях маргинального фильтра происходило лавинообразное накопление речной взвеси. 8.9–8.5 тыс. л.н уровень моря достиг отметки –32 м, и началось затопление более мелководной юго-восточной части шельфа моря Лаптевых. Маргинальный фильтр р. Лены находился на глубине 32 м примерно 8.8–8.6 тыс. л.н.

2. Временные интервалы 10.3–9.2 тыс. л.н на внешнем шельфе и 8.9–7.4 тыс. л.н на внутреннем шельфе моря Лаптевых характеризовались активным поступлением относительно теплых североатлантических вод, и, вероятно, относительно высокими температурами поверхностных вод по сравнению с современными значениями и сокращением продолжительности ледового покрова.

3. Примерно 8.6 тыс. л.н на внешнем шельфе моря Лаптевых и 7.4 тыс. л.н на внутреннем шельфе происходит установление гидрологических условий, близких современным. Авторы благодарят Е.И. Полякову (МГУ, географический ф-т), И. Матиссена (AWI, г. Бремерхафен, Германия), Х. Кассенс (GEOMAR, г. Киль, Германия), В.П. Шевченко, А.А. Ключевиткина, Е.А. Новичкову (ИО РАН, Москва), за оказанное всестороннее содействие в подготовке данной статьи, а также экипаж научно-исследовательского судна “Полярштерн” и сотрудников института GEOMAR (г. Киль, Германия) за отбор и подготовку материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке российско-германской Лаборатории полярных и морских исследований им. О.Ю. Шмидта (грант OSL-05-24), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 03-05-65018 и № 06-05-65267) и ИНТАС (грант 03-51-6682).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гуков А.Ю.* Экосистема Сибирской тундры. М.: Научный мир, 1999. 334 с.
2. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. М.: Мысль, 1982. 196 с.
3. *Захаров В.Ф.* Льды Арктики и современные природные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 136 с.
4. *Захаров В.Ф.* Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 213 с.
5. *Захаров В.Ф.* Роль заприпайных полыней в гидрологическом и ледовом режиме моря Лаптевых // *Океанология*. 1966. Т. 6. № 6. С. 1014–1022.
6. *Ключевиткина Т.С., Полякова Е.И.* Изменения палеоокеанологических условий в восточной части моря Лаптевых в голоцене по материалам исследования цист динофлагеллат // *Геология морей и океанов. Тезисы докладов XV Международной школы морской геологии*. Т. I. М.: ГЕОС, 2003. С. 98–99.
7. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
8. *Околюдов Ю.Б.* Динофлагеллаты (Dinophyceae) морей Евразийской Арктики. Дисс. на соиск. ст. докт. биол. наук. СПб, 2000. 363 с.
9. *Павлидис Ю.А.* Шельф Мирового океана в позднечетвертичное время. М.: Наука, 1992. 272 с.
10. *Семенов Ю.И., Шкатов Е.П.* Геоморфология дна моря Лаптевых // *Геология моря*. Л.: НИИГА, 1971. Вып. 1. С. 42–47.
11. *Степанова А.Ю.* Плейстоцен-голоценовые и современные остракоды моря Лаптевых и их значение для палеоэкологических реконструкций. Дисс. канд. г.-м.н.: 25.00.02. М., 2004. 248 с.
12. *Aagard K., Carmack E.C.* The role of sea ice and other fresh water in the arctic circulation // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 14485–14498.
13. *Barss M.S., Williams G.L.* Palynology and nanofossil processing techniques // *Geol. Surv. Can.* 1973. Paper 73–26. P. 1–25.
14. *Bauch H.A., Kassens H., Erlenkeuser H. et al.* Depositional environment of the Laptev Sea (Arctic Siberia) during the Holocene // *Boreas*. 1999. № 28. P. 194–204.
15. *Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E. et al.* Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin // *Global and Planetary Change*. 2001. V. 31. P. 125–139.
16. *Bauch H.A., Polyakova Ye.I.* Diatom-inferred salinity records from the Arctic Siberian Margin: Implications for fluvial runoff patterns during the Holocene // *Paleoceanography*. 2003. № 18. V. 2. P. 1–10.
17. *Bujak J.P.* Cenozoic dinoflagellate cysts and acritarchs from the Bering Sea and northern North Pacific, DSDP

- Leg 19 // *Micropaleontology*. 1984. № 30. V. 2. P. 180–212.
18. *Cremer H.* Die Diatomeen der Laptevsee (Arktischer Ozean): Taxonomie und biogeographische Verbreitung // *Berichte zur Polarforschung*. 1998. V. 260. P. 1–205.
 19. *Dale B.* Dinoflagellate cyst ecology: Modelling and geological application // *Principals and applications. New directions, other applications and floral history*/Eds. Janssonius J., McGregor D.C. 1996. American Association of Stratigraphic Palynologists 3. P. 1149–1275.
 20. *De Vernal A., Henry M., Matthiessen J. et al.* Dinoflagellate cyst assemblages as tracers of sea-surface conditions in the northern North Atlantic, Arctic and sub-Arctic seas: the new 'n = 677' data base and its application for quantitative palaeoceanographic reconstruction // *J. Quaternary Science*. 2001. № 16(7). P. 681–698.
 21. *Dmitrenko I.A., Griбанov V.A., Volkov D.L., Kassens H.* Impact of river discharge on the sea land fast ice extension in the Russian arctic shelf area // *Proc. 15th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*/Eds. Tuhkuri J., Riska K. Espoo, Finland, August 23–27. 1999. 1. P. 311–321.
 22. *Dmitrenko I.A., Hoelemann J.A., Kirilov S.A. et al.* Thermal regime of the Laptev Sea bottom layer and affecting processes // *Cryosphere of the Earth*. 2001. V. 5 (3). P. 40–55.
 23. *Gordeev, V.V.* River input of water, sediment, major ions, nutrients and trace metals from Russian territory to the Arctic Ocean // *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean*/Eds. Lewis E.L. et al. Kluwer Acad. Publ, 2000. Netherlands, P. 297–322.
 24. *Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V.* A reassessment of the Eurasian River input of water, sediment, major elements, and nutrient to the Arctic Ocean // *Am. J. Sci.* 1996. V. 296. P. 664–691.
 25. *Grosfjeld K., Larsen E., Sejrup H.P. et al.* Dinoflagellate cysts reflecting surface-water conditions in Volgafjorden, western Norway during the last 11300 years // *Boreas*. 1999. № 28. P. 403–415.
 26. *Holmes M.L.* Late Pleistocene and Holocene history of the Laptev Sea. Unpublished Doctoral Thesis, University of Washington, 1967. 99 p.
 27. *Holmes M.L., Creager J.S.* Holocene history of the Laptev Sea continental shelf // *Marine Geology and Oceanography of the Arctic Sea*/Ed. Herman Y. New York: Springer-Verlag. 1974. P. 211–229.
 28. *Ivanov V.V., Piskun A.A.* Distribution of river water and suspended sediment loads in the deltas of rivers in the basins of the Laptev and East Siberian seas // *Land-Ocean system in the Siberian Arctic: dynamics and history*. Berlin: Springer-Verlag, 1999. P. 239–250.
 29. *Jacobson D.M., Anderson D.M.* Thecate heterotrophic dinoflagellates: feeding behavior and mechanisms // *Journal of Phycology*. 1986. № 22. P. 249–258.
 30. *Kassens H., Dmitrenko I.A., Rachold V. et al.* Russian and German scientists explore the Arctic's Laptev Sea and its climate system // *EOS Transaction American Geophysical Union*. 1998. V. 79. P. 317–323.
 31. *Kleiber H.P., Niessen F.* Late Pleistocene paleoriver channels on the Laptev Sea Shelf - implications from subbottom profiling // *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History*/Eds. Kassens H. et al. New York: Springer-Verlag, 1999. P. 635–656.
 32. *Kleiber H.P., Niessen F., Weiel D.* The Late Quaternary evolution of the western Laptev Sea continental margin, Arctic Siberia-implications from sub-bottom profiling // *Global and Planetary Change*. 2001. V. 31. P. 105–124.
 33. *Kunz-Pirrung M.* Dinoflagellate cyst assemblages in surface sediments of the Laptev Sea region (Arctic Ocean) and their relation to hydrographic conditions // *J. Quaternary Science*. 2001. V. 16(7). P. 637–649.
 34. *Kunz-Pirrung M.* Distribution of aquatic palynomorphs in surface sediments from the Laptev Sea, eastern Arctic Ocean // *Land-Ocean system in the Siberian Arctic: dynamics and history*. Berlin: Springer-Verlag, 1999. P. 561–575.
 35. *Kunz-Pirrung M.* Rekonstruktion der Oberflächenwassermassen der ostlichen Laptevsee im Holozan anhand der aquatischen Palynomorphen // *Berichte zur Polarforschung*. 1998. № 281. P. 1–117.
 36. *MacDonald G.M.* Holocene treeline history and climate change across northern Eurasia // *Quaternary Research*. 2000. V. 53. P. 302–311.
 37. *Marret F., Zonneveld K.A.F.* Atlas of the modern organic-walled dinoflagellate cyst distribution // *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2003. V. 125(1–2). P. 1–200.
 38. *Matthiessen J.* Distribution patterns of dinoflagellate cysts and other organic-walled microfossils in recent Norwegian-Greenland Sea sediments // *Marine Micropaleontology*. 1995. V. 24. P. 307–334.
 39. *Matthiessen J., Kunz-Pirrung M., Mudie P.J.* Freshwater chlorophycean algae in recent marine sediments of the Beaufort, Laptev and Kara Seas (Arctic Ocean) as indicators or river runoff // *International Journal of Earth Sciences*. 2000. V. 89. P. 470–485.
 40. *Mudie P.J.* Circum-Arctic Quaternary and Neogene marine palynofloras: paleoecology and statistical analysis // *Neogene and Quaternary Dinoflagellate Cysts and Acritarchs*/Eds. Head M.J., Wrenn J.H. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation. Dallas, 1992. P. 347–390.
 41. *Mudie P.J., Harland R., Matthiessen J., de Vernal A.* Marine dinoflagellate cysts and high latitude Quaternary paleoenvironmental reconstructions: an introduction // *J. Quaternary Science*. 2001. V. 16(7). P. 595–602.
 42. *Mudie P.J., Rochon A.* Distribution of dinoflagellate cysts in the Canadian Arctic marine region // *J. Quaternary Science*. 2001. V. 16(7). P. 603–620.
 43. *Mueller-Lupp T., Erlenkeuser H., Bauch H.A. et al.* Input of terrestrial organic matter into the Laptev Sea during the Holocene - evidence from stable carbon isotopes // *J. of Earth Sciences*. 2000. V. 89. P. 563–568.
 44. *Pfirman S.L., Colony R., Nqrnberg D. et al.* Reconstructing the origin and trajectory of drifting Arctic sea ice // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102 № 12. P. 12575–12586.
 45. *Pisaric M.F.J., MacDonald G.M., Velichko A.A., Cwynar L.C.* The late-glacial and post-glacial vegetation history of the north-western limits of Beringia based on pollen, stomate and tree stump evidence // *Quaternary Science Reviews*. 2001. № 20 (1–3). P. 235–245.

46. Polyakova Ye.I., Bauch H.A., Kassens H.A. Ice-hydrological regime changes in the Late Holocene Laptev Sea // Doklady Earth sciences. 2000. № 371. V. 2. P. 315–317.
47. Polyakova Ye.I., Bauch H.A., Klyuvitkina T.S. Early to middle Holocene changes in Laptev Sea water masses deduced from diatom and aquatic palynomorph assemblages // Global and Planetary Change. 2005. V. 48. P. 208–222.
48. Polyakova Ye.I., Bauch H.A. Late Holocene variations in the conditions of fluvial runoff and sea-ice cover in the Laptev Sea // Terra Nostra. 1999. № 99. P. 11–62.
49. Proshutinsky A.P., Johnson M.A. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 1997. V. 102 (C6). P. 12493–12514.
50. Rochon A., de Vernal A., Turon J.-L. et al. Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments from the North Atlantic Ocean and adjacent basins and quantitative reconstruction of sea-surface parameters. American Association of Stratigraphic Palynologists. 1999. Contribution Series 35: 146 p.
51. Romanovskii N.N., Gavrilov A.V., Tumskoy V.E. et al. Environmental evolution in the Laptev Sea region during Late Pleistocene and Holocene // Polarforschung. 2001. № 67. P. 237–245.
52. Sher A.V., Kuzmina S.A., Kuznetsova T.V., Sul'erzhitsky L.D. New insights into the Weichselian environment and climate of the East Siberian Arctic, derived from fossil insects, plants and mammals // Quaternary Science Reviews. 2005. V. 24. P. 533–569.
53. Stockmarr J. Tablets with spores used in absolute pollen analysis // Pollen and Spores. 1971. № 13. P. 616–621.
54. Stuiver M., Reimer P.J., Bard E. et al. INTCAL 98 radiocarbon age calibration, 24000-0 cal. BP // Radiocarbon. 1998. V. 40. P. 1041–1083.
55. Svendsen J., Alexanderson H., Astakhov V. et al. Late Quaternary ice sheet history of Northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. 2004. V. 23. P. 1229–1271.
56. Timokhov L.A. Regional characteristics of the Laptev and the East Siberian Seas: climate, topography, ice phases, thermohaline regime and circulation // Russian-German Cooperation in the Siberian Shelf Seas: Geosystem Laptev Sea Eds. Kassens H, et al. Reports on Polar Research. 1994. № 144. P. 15–31.

Holocene Changes in Paleohydrological Conditions in the Laptev Sea Based on Aquatic Palynomorph Assemblages

T. S. Klyuvitkina, H. A. Bauch

On the basis of aquatic palynomorph assemblages in sediment cores obtained from the eastern Laptev Sea shelf, major phases of environmental change associated with the last postglacial global sea-level rise can be recognized for the time since 11.3 calendar years BP (cal. ka). Until 11.3 cal. ka, the outer Laptev Sea shelf (51 m depth) was inundated and paleoenvironmental conditions 11.3–10.3 cal. ka were characterized by increased precipitation of river-loaded matter in a river-proximal environment. 1–1.5 cal. ka later the inner shelf (depth 32 m) was flooded but were influenced by riverine input until 7.4 cal. ca. The time interval 10.3–7.4 cal. ka was marked by a predominance of the dinoflagellate cyst *Operculodinium centrocarpum* as well as by the appearance of relatively warm-water indicative species in the outer Laptev Sea and increasing of AH-Ratio, due to enhanced influence of Atlantic water at the continental margin. Modern-like environments were established on the eastern outer Laptev Sea shelf approximately 8.6 cal. ca, on the inner shelf –7.4 cal. ka.