

## Часть 6.

### Материалы Круглого стола:

#### «Роль климатических изменений в эволюции разноранговых природных геосистем».

УДК 551.461.8

DOI: 10.35735/9785604968338\_488

### ЭВОЛЮЦИЯ СРЕДЫ, КЛИМАТА И ПРОДУКТИВНОСТИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ПАЦИФИКИ В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ И ГОЛОЦЕНЕ (НА ОСНОВЕ ДИАТОМОВОГО АНАЛИЗА)

А.В. Артемова<sup>1</sup>, С.А. Горбаренко<sup>1</sup>, Г.В. Ковалева<sup>2</sup>, В.А. Кузьмина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток; <sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Россия

**Аннотация.** Впервые, благодаря высокой скорости осадконакопления и подробному отбору для диатомового анализа проб морских осадков с были выделены как тысячелетние, так и столетние изменения среды восточного побережья Камчатки, связанные с глобальными и сопутствующими региональными климатическими событиями за последние 20 тысяч лет. Развитие диатомей проходило на фоне смены режимов океанической циркуляции, изменения продуктивности поверхностных вод, их температуры, влияния льда и других палеоклиматических характеристик.

**Ключевые слова:** диатомовые водоросли; поздний плейстоцен; голоцен; бёллинг, аллерёд; средний дриас, продуктивность; палеоклимат

### EVOLUTION OF ENVIRONMENT, CLIMATE AND PRODUCTIVITY OF THE NORTHWEST PACIFIC IN THE LATE PLEISTOCENE AND HOLOCENE (BASED ON DIATOM ANALYSIS)

A.V. Artemova<sup>1</sup>, S.A. Gorbarenko<sup>1</sup>, G.V. Kovaleva<sup>2</sup>, V.A. Kuzmina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok

<sup>2</sup> Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don.

**Abstract.** For the first time, due to the high rate of sedimentation and detailed selection of samples of marine sediments for diatom analysis, both millennial and centennial changes in the environment of the eastern coast of Kamchatka were identified, associated with global and accompanying regional climatic events over the past 20 thousand years. The development of diatoms took place against the backdrop of changes in ocean circulation regimes, changes in the productivity of surface waters, their temperature, the influence of ice and other paleoclimatic characteristics.

**Key words:** diatoms; Late Pleistocene; Holocene; Bölling, Allerød; Old Dryas, productivity

**Введение.** Исследуемый район Северо-западной части Тихого океана (СЗТО) находится под влиянием двух барических центров – Алеутского минимума и Сибирского максимума. Ледовый покров не образуется дальше прибрежной полосы, однако в экстремальные годы имеет место вынос плавучих льдов из Берингова моря вдоль восточного побережья Камчатки.

Низкая биопродуктивность во время оледенений часто объясняется большей физической стратификацией, которая снижала поступление питательных веществ в поверхностные воды. Развитие галоклина приводило к сильной стратификации и более низкой базовой продуктивности [9, 4].

В настоящее время в северной части Тихого океана, представляющей конечное звено глобального термохалинного конвейера, вследствие сильного поверхностного галоклина не происходит образования глубинных вод [12]. Во время максимума последнего оледенения содержание CO<sub>2</sub> в атмосфере уменьшалось из-за ослабления вентиляции Мирового океана и накопления в нем дополнительного количества газов и нутриентов [9]. При потеплении усиление регионального ветрового апвеллинга, или уменьшение объемов льда способствовало поступлению на поверхность глубинных вод Южного океана, обогащенных нутриентами, и доставляющего CO<sub>2</sub> в атмосферу, что стимулировало продуктивность диатомовых водорослей [9]. Вследствие одновременного усиления формирования антарктических промежуточных вод, распространяющихся и в северное полушарие, увеличивалось содержание нутриентов в промежуточных и верхних слоях вод Тихого океана [6,2], апвеллинг поднимал питательные вещества до поверхностных слоев, и доступность нутриентов приводила к росту продукции диатомей [4]. Резкие переходы от похолоданий к потеплениям и сопутствующие им климатические и океанологические явления стимулировали пики продуктивности во время оптимума голоцена и особенно во время бёллинг-аллерёд [5,7]. Чтобы восполнить имеющиеся пробелы в информации о палеоклиматической изменчивости в СЗТО, мы провели диатомовый анализ осадков, датированных с высоким разрешением.

**Материалы и методы.** Материалом исследования послужил керн донных осадков LV 63-41-2 длиной 458 см, глубина отбора 1924 м со склона подводного продолжения структуры Шипунского полуострова Камчатки. Исследуемый участок расположен в районе действия Восточно-Камчатского течения.

Возрастная модель керна LV63-41-2 была построена с помощью AMS радиоуглеродного датирования, изменения цветковых параметров, магнитной восприимчивости осадка, содержания IRD с корреляцией индексов продуктивности и относительной палеоинтенсивности магнитного поля Земли с теплыми и холодными столетними событиями записей  $\delta^{18}O$  сталагмитов пещер Китая [5,10,11] и  $\delta^{18}O$  ледового керна Гренландии [8].

Пробы на диатомовый анализ отбирались через каждый сантиметр керна. Обработка проб проводилась по стандартной методике с помощью тяжелой калий-кадмиевой жидкости [1]. Всего было обработано и проанализировано 158 образцов на содержание диатомовых водорослей и таксономический состав. С помощью светового микроскопа Olympus BX-43 для каждого изученного образца было подсчитано и идентифицировано минимум по 300-350 створок. Всего было идентифицировано 126 таксонов диатомовых водорослей. В керне осадков было отмечено как высокое видовое разнообразие диатомовых водорослей, так и периоды, когда преобладало несколько видов.

Для отображения палеоклиматических тенденций диатомовые водоросли были сгруппированы в экологические группы, что позволило восстановить поступление питательных веществ или закономерности развития диатомовых водорослей и сукцессии среди видов по масштабу времени. Особенно показательными для палеоокеанологической интерпретации являются: холодноводные открытоокеанические виды, ледовые виды, связанные с морским льдом, пресноводные виды, вымершие виды.

Доминанты колонки виды *Thalassiosira antarctica*, *Neodenticula seminae*, *Rhizosolenia hebetata* f. *hiemalis*, *Actinocyclus curvatulus*, *A. ochotensis*, *Thalassiothrix longissima*, *Shionodiscus latimarginatus*, представители рода *Chaetoceros*, *Coscinodiscus marginatus*.

**Результаты и их обсуждение.** В результате детального исследования диатомовых комплексов плейстоценовых и голоценовых осадков изученной колонки было выделено несколько периодов смены гидробиологических условий, связанных со значительными палеоклиматическими событиями-периодами похолоданий, потеплений с изменением океанологической циркуляции. (Рис. 1).

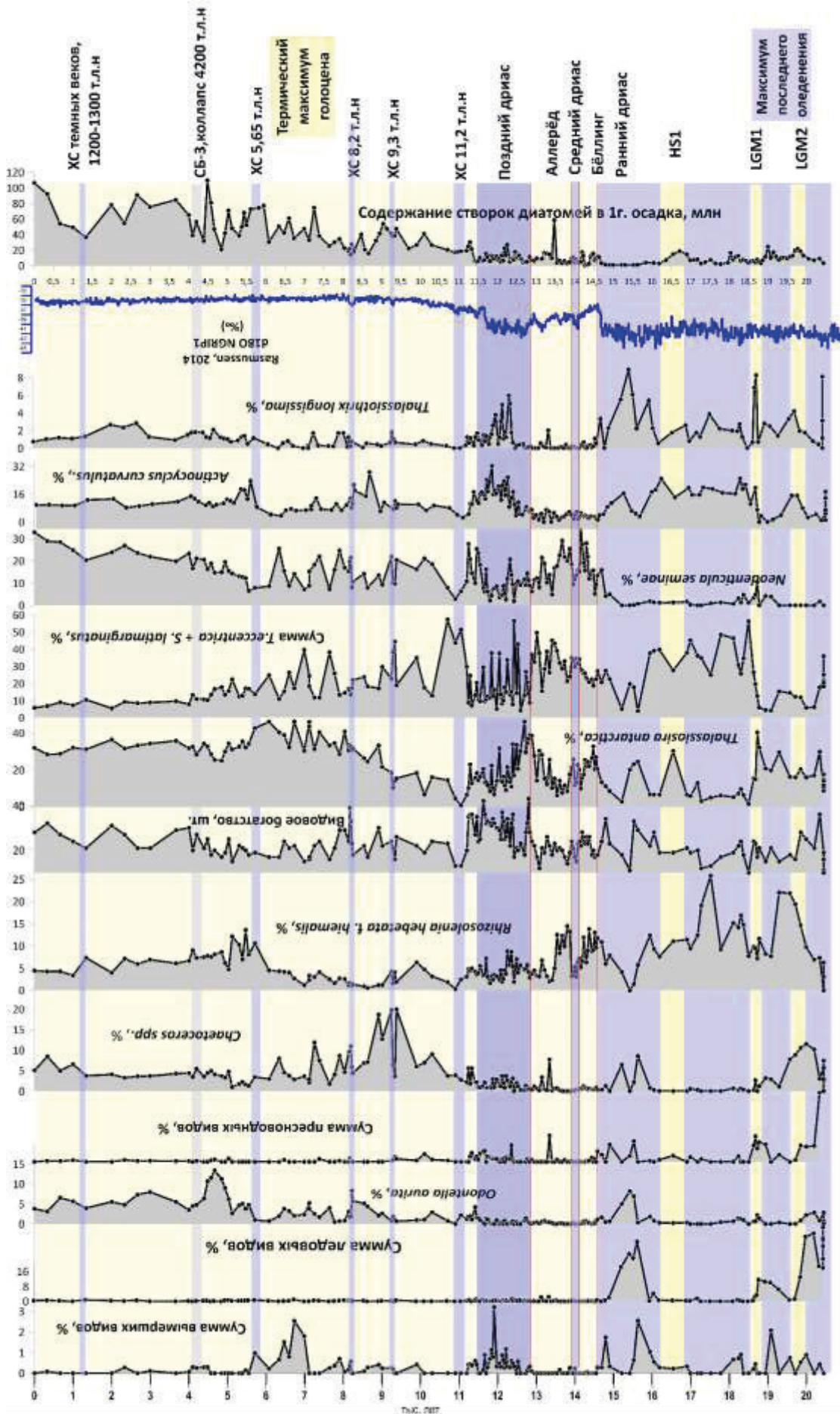


Рис. 1. Распределение численности, видовой разнообразия и процентного содержания наиболее представительных видов диатомовых водорослей в осадке керна LV63-41-2



Горизонтальными полосами показаны глобальные климатические события (последний ледниковый максимум, ранний дриас, бёллинг, средний дриас, аллерёд, поздний дриас, голоцен) и столетние события, согласно возрастной модели керна [5]. Синие линии показывают холодные события, желтые теплые. В голоцене по изменениям индикаторных видов диатомей выделены: начало голоцена, быстрое потепление 11,7 т.л.н., холодное событие 11,4 ка (пребореальная осцилляция 1), холодное событие 9,3 ка, холодное событие 8,2 ка (резкое похолодание, граница раннего и среднего этапов голоцена), терминация термического максимума голоцена (событие Бонда 4), коллапс неолитической культуры Китая, известный как событие Бонда 3 (граница среднего и позднего голоцена), холодное событие 1,3 ка согласно [10,11].

#### ***Последний ледниковый максимум (21-14,7 т.л.н., LGM)***

В комплексе диатомей этого периода в сумме доминируют открыто-океанические диатомей, толерантные к низкой освещенности, а также ледовые, пресноводные и ледово-неритические виды. Отмечено большое количество спор *Thalassiosira antarctica*.

Участие криофильных диатомей указывает на влияние льда в этот период в субарктической СЗТО, о чем свидетельствует и отсутствие тепловодных видов. Обильно представлены водоросли-криофилы *Fragilariopsis*, *Nitzschia*, *Thalassiosira*, *Atteya*, *Navicula*, *Thalassiosira*, *Chaetoceros* и т.д., развивающиеся в толще многолетнего льда и у кромки отступающих льдов. Содержания диатомей низкое, створки в осадке отмечены малыми размерами клеток. Диатомовая продуктивность ослабевала, вероятно, из-за морского ледяного покрова и ослабленного вертикального перемешивания водных масс во время заключительной и максимальной стадии похолодания. Недостаток поступления питательных веществ объясняет низкую продуктивность диатомей. Апвеллинг в ледниковые периоды был слабее, и его область смещалась к югу; снижение биологической продуктивности в субарктической северо-западной части Тихого океана было вызвано снижением поступления питательных веществ во время LGM [5]. Также из-за продолжительного сезона стояния льда, таяния льда, распреснения поверхностного слоя воды и возникавшего в это время галоклина, вероятно был затруднен рециклинг нутриентов, что тоже препятствовало биологической продуктивности.

Снижение численности створок диатомей связано и с их разбавлением терригенным материалом, а также растворением некоторого числа диатомовых панцирей при захоронении.

Самые неблагоприятные условия для развития диатомей отмечены с 19,5 до 21 т.л.н., к обычным для данного района видам прибавлена большая доля принесенных со льдами криофильных, бентических и пресноводных видов. Особенный интерес представляет высокая доля участия пресноводных видов, особенно обильны мелкие клетки вида *Aulacoseira subborealis* (в среднем 5 мкм).

В современности *Aulacocira* имеет исключительно пресноводный образ жизни, это обычные обитатели озер и рек. Предполагаем, что эти виды попадали в осадки изученного района за счет переноса льда из прибрежных районов севернее места отбора колонки. Усиление действия Сибирского антициклона и активность ветров северного направления стимулировало вынос прибрежного льда со стороны Кроноцкого и Камчатского заливов, в которые впадает несколько рек и на побережье есть озера и лиманы. Также ледовые массы вероятно, выносило и из Берингова моря усилившемся Восточно-Камчатским течением с большей продолжительностью и большими объемами, нежели в современное время, когда только в экстремально суровые годы лед спускается до района исследования. Разгрузка льда, дрейфующего из Берингова моря и побережья восточной Камчатки, приводила к таянию его в летнее время, что затрудняло развитие открыто-океанических диатомей. Летних форм диатомей родов *Actinocyclus*, *Thalassiothrix*, *Shionodiscus*, *Rhizosolenia*, *Coscinodiscus*, *Thalassiosira* скорее всего ограничивало в развитии меньшее количество нутриентов и короткий весенне-летний сезон открытой воды.

Снижение обилия ледовых диатомей и появление в составе доминантов галофильного вида *Rhizosolenia hebetata* указывает на снижение влияния морского льда в период с 19,5 до 16 т.л.н. когда соленость в районе приблизилась к современной. Низкое содержание диатомовых водорослей свидетельствует о по-прежнему низкой биологической продуктивности. С 16 до 15 т.л.н. в составе комплекса диатомей снова появляются ледовые виды, вероятно вслед за усилением холодных условий. После 15 т.л.н. уменьшение доли криофилов и увеличение доли участия тепловодного *N. seminae* указывает на повышение температуры в субарктической северо-западной части Тихого океана.

При низкой биологической продуктивности диатомей, отчетливо выделены кратковременные события потеплений, отразившиеся в комплексах диатомей и демонстрирующие столетнюю климатическую изменчивость, согласующуюся с изменениями активности восточноазиатских летних муссонов в северо-западной части Тихого океана.

#### **Потепления бёллинг, аллерёд, похолодание средний дриас (14,7–12,8 т.л.н.)**

Дегляциация произошла в начале потепления бёллинг, оставив субарктическую часть Тихого океана свободной ото льда, что совпало с некоторым ростом продуктивности диатомей, возможно, из-за большей доступности питательных веществ из тихоокеанских глубоководных водных масс в результате апвеллинга [2,5]. Однако концентрация диатомовых водорослей в осадке не была такой высокой, как в других районах Тихого океана, вероятно, бурному развитию диатомей мешало активное таяние морского льда и сток пресной воды вдоль берегов Камчатки. Выраженное потепление отразилось на значительном росте численности *N. seminae* с 14,7 т.л.н. Высокие потоки органического вещества в осадке, указывают на резкое увеличение продуктивности за счет других, вероятно карбонатных групп планктона [5].

Похолодание средний дриас проявилось в комплексе диатомовых водорослей в понижении доли участия и *N. seminae*, и галофильного вида *Rhizosolenia hebetata*, что указывает на вероятное влияния морского льда в период с 14,1 до 13,9 т.л.н.

Потепление аллерёд отразилось в составе комплекса диатомей в усилении доминирования открыто-океанических видов *Neodenticula seminae*, *Shionodiscus latimarginatus*, *Rhizosolenia hebetata* при существенном снижении участия, обычно доминирующего в комплексах диатомей вида *Thalassiosira antarctica*.

#### **Похолодание поздний дриас (12,7-11,7-т.л.н.)**

Судя по перестройке диатомового комплекса и снижению продуктивности диатомей, во время похолодания поздний дриас региональные экологические условия снова ухудшились, хотя влияние морского льда у южной Камчатки было меньше, чем во время LGM. К низкой продуктивности кремнистого микропланктона привело усиленное выхолаживание поверхностного слоя воды и распреснение, что приводило к установлению слоя воды, ограничивающего поступление нутриентов, и препятствующего также опусканию диатомей ниже, к слоям, достаточно насыщенным биогенными веществами. На изменения условий освещенности и недостаток нутриентов указывают доминирование видов, адаптирующиеся к нехватке питательных веществ *Thalassiosira antarctica*, *Actinocyclus curvatulus*, *Thalassiothrix longissima*, *Coscinodiscus marginatus*. Криофильные виды незначительны в комплексе, отмечается появление переотложенных вымерших и бентических видов, вероятно снесенных с морским льдом с побережья. Комплексы диатомовых водорослей демонстрируют две фазы холодного периода поздний дриас - более холодные условия окружающей среды отмечены в поздней фазе после 12,3 т.л.н.

#### **Голоцен (с 11,2 т.л.н.)**

С наступлением голоцена потепление и изменения циркуляции в северной части Тихого океана сыграли решающую роль в доступности питательных веществ для диатомей, что отразилось в увеличении их продуктивности в районе исследования, что произошло за счет

регионального апвеллинга биогенных веществ вместе с выбросом CO<sub>2</sub> в атмосферу. Доминанты комплекса диатомей *T. antarctica* и *N. seminae*. Субдоминирующее положение занимают открыто-океанические виды; отмечены в комплексе таксоны, обычные для шельфовых областей Берингова моря. Перестройка диатомовых комплексов, смена доминантов, изменение численности демонстрируют шесть столетних похолоданий в голоцене, хорошо коррелирующие с холодными событиями, зарегистрированным в NGRIP, так называемые голоценовые события Бонда [3]. Отмечены: похолодание ~11,2 т.л.н., событие низкой продуктивности ~9,3 т.л.н., холодное событие 8,2 т.л.н. (известный хроностратиграфический маркер на границе раннего и среднего голоцена), между которыми отмечен период перестройки гидрологической обстановки, когда условия развития диатомей значительно отличались от современных. Были выделены кратковременные голоценовые климатические события, на материке сопровождающиеся засухами и опустыниванием территорий, похолодания, сопровождавшие перестройку неолитовых культур. Выделен климатический период 4200-4300 т.л.н., маркер границы среднего и позднего голоцена, вызванный похолоданием и изменением муссонной деятельности на востоке Евразии, определенный по сталагмитам пещеры Донге в Китае [4,10,11].

**Выводы.** По результатам диатомового анализа было выявлено, что глобальные климатические события последних 20 тысяч лет- голоцен, ранний дриас, аллерёд, средний дриас, беллинг, ранний дриас и последний ледниковый максимум сопровождались значительными региональными изменениями среды, отразившимися на продуктивности диатомей, их таксономическом разнообразии и смене диатомовых комплексов.

На основе диатомового анализа были отмечены периоды перестройки режимов океанической циркуляции и почти сомкнутого зимнего ледяного покрова, интенсификации Восточно-камчатского течения и разгрузки льда, дрейфующего вероятно из Берингова моря и с побережья восточной Камчатки во время LGM. Впервые, благодаря высокой скорости осадконакопления и подробному отбору для диатомового анализа проб морских осадков с были также выделены как тысячелетние, так и столетние изменения среды изучаемого региона. Благодаря высокой скорости осадконакопления, выделен комплекс диатомей, соответствующий кратковременному похолоданию среднего дриаса, длящегося всего 200 лет. Ранее потепления Беллинг и Аллеред в климатологической последовательности этой части Тихого океана не разделялись, и считались одним потеплением Беллинг/Аллеред, поскольку свидетельств прихода похолодания среднего дриаса не было отмечено.

Комплексы диатомовых водорослей демонстрируют две фазы холодного периода поздний дриас. Также, были выделены кратковременные голоценовые климатические события, на материке сопровождающиеся засухами и опустыниванием территорий, похолодания, сопровождавшие перестройку неолитовых культур.

**Благодарность.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-17-00118.

Часть микропалеонтологических исследований проводилось в рамках ГЗ ЮНЦ РАН № 122011900166-9.

## Литература

1. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Л.: Наука, 1974. Т. I. 404 с.
2. Anderson, R. F., S. Ali, L. I. Bradtmiller, S. H. H. Nielsen, M. Q. Fleisher, B. E. Anderson, L. H. Burckle. Wind-Driven Upwelling in the Southern Ocean and the Deglacial Rise in Atmospheric CO<sub>2</sub>. Science, 2009, Vol. 323. no. 5920, pp. 1443 – 1448

3. Bond G., W. Showers, M. Cheseby, R. Lotti, P. Almasi, P. deMenocal, P. Priore, H. Cullen, I. Hajdas, G. Bonani. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates // *Science*, 278 (5341) (1997), pp. 1257-1266, 10.1126/science.278.5341.1257
4. Galbraith, E. D., Jaccard, S. L., Pedersen, T. F., Sigman, D. M., Haug, G. H., Cook, M., Southon, J. R. and Francois, R.: Carbon dioxide release from the North Pacific abyss during the last deglaciation., *Nature*, 449(7164), 890–893, doi:10.1038/nature06227, 2007.
5. Gorbarenko S.A., Artemova A.V., Psheneva O.Yu., et al. Orbital-millennial-centennial evolution of paleoceanography and sea ice in the marginal northwestern Pacific (off Kamchatka) during LGM - Holocene inferred from biological (diatom, benthic foraminifera and pollen) and geochemical proxies // *Paleoceanology, Paleoclimatology* (in press)
6. Marchitto T. M., S. J. Lehman, J. D. Ortiz, J. Fluckiger, A. van Geen, Marine Radiocarbon Evidence for the Mechanism of Deglacial Atmospheric CO<sub>2</sub> Rise, *Science* 2007, Vol 316, 1456-1459.
7. Max L., J.-R. Riethdorf, R. Tiedemann, M. Smirnova, L. Lembke-Jene, K. Fahl, D. Nürnberg, A. Matul, G. Mollenhauer. Sea surface temperature variability and sea-ice extent in the subarctic Northwest Pacific during the past 15,000 years // *Paleoceanogr.*, 27 (3) (2012), pp. n/a-n/a, 10.1029/2012PA002292
8. Rasmussen S.O., M. Bigler, S.P. Blockley, et al. A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy // *Quat. Sci. Rev.*, 106 (2014), pp. 14-28, 10.1016/j.quascirev.2014.09.007
9. Sigman, D.M., M.P. Hain, and G.H. Haug (2010), The polar ocean and glacial cycles in atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, *Nature*, 466, 47-55.
10. Wang Y, Cheng H, Edwards RL, He Y, Kong X, An Z, Wu J, Kelly MJ, Dykoski CA, Li X. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate // *Science*. 6;308(5723):854-7 (2005) /science.1106296. PMID: 15879216
11. Wang Y., H. Cheng, L. Edwards, X. Kong, Xiaohua. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years // *Nature* (2008).
12. Warren B.A. Why is no deep water formed in the North Pacific? // *J. of Marin. Res.* 1983.V. 41. P. 327-347.