

ВЛИЯНИЕ МОРСКИХ ЛЬДОВ И АЙСБЕРГОВ, ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИИ И ПРОДУКТИВНОСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 130 ТЫСЯЧ ЛЕТ

Горбаренко С.А., Василенко Ю.П., Артемова А.В., Янченко Е.А., Новоселова Ю.В.,
Баженов И.И.,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация. Выявлены пространственная неоднородность изменений гидрологии среды, ледовых условий и продуктивности Охотского моря за последние 130 тысяч лет в связи с глобальными изменениями климата и кардинальные особенности изменений условий среды юго-восточной части моря. Во время оледенения и дегляциации западная и центральная части моря испытывали сильное влияние морских льдов, формирующихся в Беринговом и Охотском морях. В юго-восточной части моря в это время значительное влияние на среду и продуктивность поверхностных вод оказывали также периодические сбросы айсбергов в связи с усилением образования ледников на Камчатке и схода их в море на юго-западном побережье Камчатки.

Ключевые слова: изменения климата, морские льды, айсберги, продуктивность, ледовый разнос

THE INFLUENCE OF SEA ICE AND ICEBERGS, CHANGES IN THE HYDROLOGY AND PRODUCTIVITY OF THE SEA OF OKHOTSK IN SPACE AND TIME OVER THE PAST 130 THOUSAND YEARS

Gorbarenko S.A., Vasilenko Yu.P., Artemova A.V., Yanchenko E.A., Novoselova Y.V.,
Bazhenov I.I.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences

Abstract. The spatial heterogeneity of changes in the hydrology, environment, ice conditions and productivity of the Sea of Okhotsk over the past 130 thousand years in connection with global climate changes and cardinal features of changes in the environmental conditions of the southeastern part of the sea have been revealed. During glaciation and deglaciation, the western and central parts of the sea were strongly influenced by sea ice forming in the Bering and Okhotsk Seas. In the southeastern part of the sea at that time, periodic iceberg discharges also had a significant impact on the environment and productivity of surface waters due to the increased formation of glaciers in Kamchatka and their descent into the sea on the southwestern coast of Kamchatka.

Keywords: climate change, sea ice, icebergs, hydrology, productivity, ice rafted debris

Введение. Охотское море является самым южным краевым бассейном, глубоко вдающимся в северо-восток Евразийского континента, с сезонным покрытием морскими льдами в настоящее время. Поэтому это окраинное море претерпевало значительные изменения условий среды и гидрологии во время оледенений и межледниковий плейстоцена, реконструкция которых позволяет лучше понять, как глобальные изменения климата влияют на среду таких регионов. Несмотря на довольно интенсивные исследования палеоокеанологии этого моря за последние 30 лет международным сообществом [4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13], его юго-восточная часть остается слабо изученной по сравнению с западной и центральными областями. Однако этот юго-восточный сегмент моря представляется крайне важным районом для изучения палеоокеанологии северо-западной части Тихого океана и эволюции оледенения Камчатского полуострова. Известно, когда текущее на юг Восточно Камчатское течение

минует полуостров, значительная часть его заходит в Охотское море и продолжает движение на север как Западно Камчатское течение [9]. Согласно палеогеографическим и геоморфологическим исследованиям российских ученых, во время оледенений существующие сейчас горно-долинные ледники Камчатки значительно усиливались в объеме и пространстве и выходили за пределы полуострова со сбросом айсбергов в море с восточной и юго-западной сторон Камчатки [1]. Для северо-западной части Тихого океана первые обоснованные свидетельства сброса айсбергов с Камчатки во время морских изотопно-кислородных стадий (МИС) 4 и 6 были представлены [8] на основании изотопно-геохимических исследований осадков керна отобранного с возвышенности Тейнджи (северная часть Императорских гор). Нюрнберг и др. [11] показали эпизодическое влияние сброса айсбергов с юго-западной части Камчатки в юго-восточную часть Охотского моря за последние 350 тысяч лет. Однако их выводы были в основном основаны на изучении поступления терригенного материала в осадки, а представленные ими записи изотопного состава кислорода раковин планктонных фораминифер ($\delta^{18}\text{O}$ пф) имели низкое разрешение по времени, что требует дополнительных высокоразрешающих исследований в Охотском море.

Для этого мы провели высокоразрешающее изучение осадков керна LV 76-9-1 из юго-восточной части Охотского посредством спектра литологических и изотопно-геохимических методов и построили возрастную модель осадков за последние 130 тысяч лет. Для анализа пространственных особенностей ледовых условий этого района моря и понимания влияния периодических сбросов айсбергов с Камчатки средю всего Охотского моря при глобальных изменениях климата, мы провели сравнение результатов, полученных по этому керну с данными ранее опубликованных палеоокеанологических исследований западной и центральной частей Охотского моря [5, 7], соответственно.

Материалы и методы. Осадки керна LV76-9-1 (далее 9-1) отобранного в юго-восточной части Охотского моря ($50^{\circ} 29,21'$ с.ш., $153^{\circ} 24,05'$ в.д., глубина моря 924 м) были изучены на содержание общего органического углерода (ООУ), хлорина, содержание терригенных материала ледового разнота (ТМЛР) и магнитную восприимчивость (МВ) осадка стандартными методами [5, 6, 7 и 8]. По раковинам планктонных фораминифер *Neoglobobulimina pachyderma* (s.) и бентосных фораминифер *Uvigerina* spp. измерен их изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$ пф, $\delta^{18}\text{O}$ бф) на масс-спектрометре Finigan-MAT 253 в ДВГИ ДВО РАН [15]. Возрастная модель осадков керна построена на основе радиоуглеродных датировок, определения положения экскурсов магнитного поля Земли и корреляции резких изменений параметров продуктивности моря (ООУ, хлорин) с датированными глобальными изменениями климата аналогично [6, 7, 8].

Результаты и их обсуждение. Для выявления особенностей ледовых условий, седиментации и продуктивности Охотского моря за последние 130 тысяч лет и их пространственной дифференциации на Рис. 1 показаны изменения за последние 130 тысяч лет $\delta^{18}\text{O}$ пф, $\delta^{18}\text{O}$ бф, МВ и ООУ для кернов 9-1 (данная работа), LV28- 40-5 (далее 40-5) [7] и MR06-04 PC-7R (далее 7P) [5], расположенных в юго-восточной, западной, центральной частях моря, соответственно, а также скоростей аккумуляции терригенного материала в осадках керна LV28-44-3 (далее 44-3) также отобранного на юго-востоке моря [11]. Для сравнения региональных записей $\delta^{18}\text{O}$ пф и $\delta^{18}\text{O}$ бф со стандартной записью $\delta^{18}\text{O}$ бентосных фораминифер открытого океана во времени, мы использовали стек $\delta^{18}\text{O}$ бентосных фораминифер для глубинных вод Тихого океана LS 16 [10] с поправкой + 0.23 ‰ согласно полученным значениям $\delta^{18}\text{O}$ бф из глубоководных осадков Западного Субарктического Круговорота во время максимума последнего оледенения [3], глубинные воды которого входят в Берингово море и в Охотское море [9].

Воздействия морских льдов и айсбергов на средю акватории сопровождается осаждением на дне бассейна ТМЛР, захваченного ранее в шельфовой зоне и на материке, при таянии льдов в море. Поэтому мы для каждого керна использовали данные магнитной восприимчивости осадка, отражающих поступление на дно ТМЛР с большим содержанием ферромагнетиков.

Образование морских льдов в высоких широтах приводит к выбросу в воду соли, увеличению плотности поверхностных вод и в результате формированию промежуточных вод, что сопровождается уменьшением их солености и уменьшением содержания тяжелого изотопа кислорода в них. Поэтому в качестве индикатора влияния морских льдов на среду, мы использовали записи $\delta^{18}\text{Обф}$, фиксирующих изменения параметров придонных вод.

Так как покровные ледники имеют очень низкие значения $\delta^{18}\text{О}$ воды, то при их таянии в море значения $\delta^{18}\text{О}$ поверхностных вод уменьшаются. Поэтому для фиксации влияния айсбергов на среду мы использовали записи $\delta^{18}\text{Опф}$. Наконец, в качестве индикатора изменений продуктивности поверхностных вод мы использовали записи содержания ООУ в осадках.

Записи $\delta^{18}\text{Обф}$ кернов 40-5 и 9-1 свидетельствуют о сильном и изменчивом влиянии морских льдов на формирование промежуточных вод Охотского моря, которое распространялось как минимум до глубин 1312 метров (глубина моря отбора керна 40-5) за последнее оледенение и дегляциацию (Рис.). Судя по разнице между кривыми $\delta^{18}\text{Обф}$ кернов 40-5 и 9-1 и стеком LS 16 формирование промежуточных вод усиливалось во время холодных МИС 2 и особенно 4. Влияние морских льдов на формирование промежуточных вод ослабевало во время относительно теплых МИС 3, 5.3 и особенно межледниковий (Рис.). Как показывают записи $\delta^{18}\text{Обф}$ керна 9-1, расположенном на входе Восточно Камчатского течения в Охотском море, основное влияние на формирование в нем промежуточных вод оказывало интенсивное образование морских льдов в Беринговом море. Однако, некоторые уменьшения $\delta^{18}\text{Обф}$ керна 40-5 из западной части моря относительно одновозрастных значений $\delta^{18}\text{Обф}$ керна 9-1 во время МИС 4 и 2 свидетельствуют также и о существенном вкладе морских льдов формирующихся в Охотском море, особенно в холодную МИС 4 (Рис.).

Записи магнитной восприимчивости осадков и параметра продуктивности показывают коренные отличия в поступлении ТМЛР и продуктивности юго-восточного сегмента от остальной части Охотского моря (Рис.). В западной и центральной частях моря повышение поступления ТМЛР, поставляемого преимущественно морскими льдами (высокие значения МВ), происходили в холодные ИКС 2, 4, 5.2 и 5.4, когда происходило усиление формирования морских льдов в Охотском море [4, 6, 7, 12, 13]. Соответственно усиление влияния морских льдов на среду западной и центральной частей моря в холодные МИС приводило к сокращению вегетационного периода и уменьшению продуктивности вод как показывают изменения ТОС; и напротив, в более теплые МИС продуктивность моря увеличивалась (Рис.). В юго-восточном секторе моря (кern 9-1) поступление ТМЛР даже уменьшалось во время холодной МИС 4 и затем слабо изменялось во время МИС 3-5.5. Продуктивность вод в этом районе моря во время холодной МИС 4 была примерно такая же как при МИС 3 и 5.5 и несколько увеличивалась во время МИС 1, 5.1-5.4. Это свидетельствует о значительном сопутствующем влиянии айсбергов на среду и продуктивность юго-восточной части моря во время оледенения и особенно МИС 4 вследствие усиления оледенения Камчатки в это время и сброса айсбергов в этот район.

Как показывают результаты МВ керна 7Р и скорости аккумуляции ТМЛР в керне 44-3, активное поступление льдов в Охотское море происходило в ранней половине предпоследнего межледниковья (МИС 5.5), вероятно, вызванное сильным развитием морских льдов во время предыдущей холодной МИС 6.2, которое, вероятно, продолжало оказывать влияние на среду всего моря и во время ранней половины МИС 5.5. Об этом свидетельствуют и низкие значения продуктивности моря и тяжелые значения $\delta^{18}\text{Опф}$ в центральной части моря (кern 7Р) это время, вследствие сокращения вегетационного периода и значительного охлаждения поверхностных вод (Рис.). Только в поздней части МИС 5.5 влияние морских льдов на среду Охотского моря сократилось, но тем не менее условия среды моря были менее благоприятны для продуктивности поверхностных вод по сравнению с последним межледниковьем - МИС 1 (Беллинг /Аллерод потепление-голоцен) (Рис.).

Изотопные записи кернов 40-5 и 9-1 показывают несколько тысячелетних уменьшений $\delta^{18}\text{Опф}$ во время МИС 4, 3 и реже в МИС 5.5, 5.2 и 2, которые могли быть вызваны усилениями

оледенения Камчатки и периодическими сбросами айсбергов в юго-восточную часть моря с юго-восточного побережья полуострова (Рис. желтые вертикальные бары). В осадках керна 44-3, расположенного немного севернее керна 9-1, Нюрнберг и др. [11] наблюдали подобную серию резких пиков скоростей аккумуляции ТМЛР, вызванную по их заключению, периодическими сбросами айсбергов (Рис.). Примечательно, что в осадках керна 40-5, расположенного в западной части моря, эти события сброса айсбергов были выражены только в значениях $\delta^{18}\text{Opф}$, но не сопровождались повышением ТМЛР. Это указывает, что периодические опреснения поверхностных вод при поступлении айсбергов в юго-восточную часть моря трансформировалось во всем море посредством циклонической циркуляции вод, но сами айсберги не переносились далеко от мест их сброса. В центральной части моря (кern 7P) влияние притоков распресненных вод от сброса айсбергов были менее заметно в связи с более сильным поступлением поверхностных вод из Тихого океана (Рис. 1).

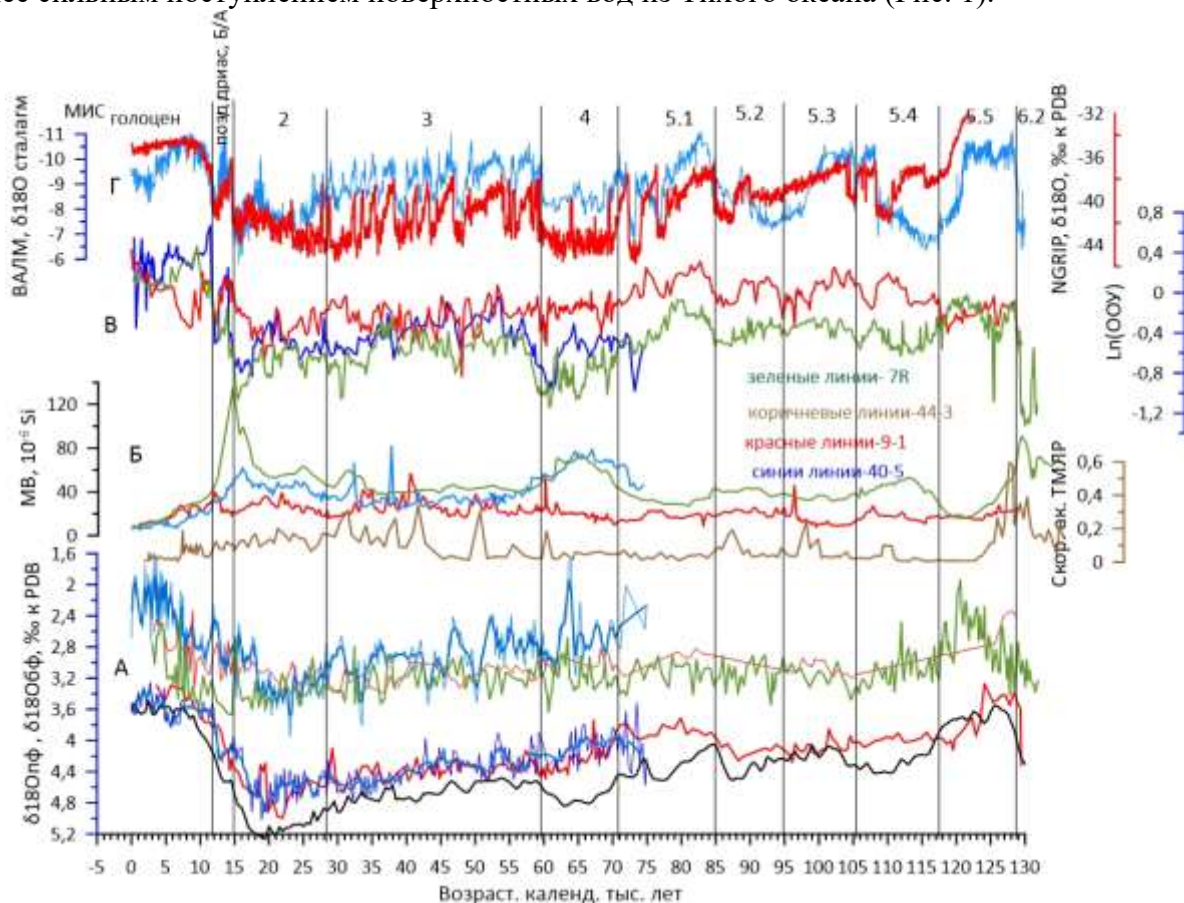


Рис. 1. Изменения ледовых условий, седиментации и продуктивности западной (кern 40-5), центральной (кern 7P) и юго-восточной частей (кernы 9-1 и 44-3) Охотского моря за последние 130 тысяч лет. А, - изменения значений $\delta^{18}\text{Opф}$ и $\delta^{18}\text{Обф}$ в разных частях моря в сравнении с со стеклом бентосных фораминифер LS 16. Б, -изменения магнитной восприимчивости осадков данных кернов. С,-изменения содержания общего органического углерода в осадках кернов. Изменения изотопного состава ледового керна NGRIP Гренландии [14] и интенсивности восточно-Азиатских муссонов [2]. В верхней части рисунка показана последовательность изотопно-кислородных стадий.

Выводы.

На основе изучения литологических и изотопно-геохимических параметров осадков керна из юго-восточной части Охотского моря и анализа полученных ранее данных изменения палеосреды западной и центральной частей моря за последние 130 тысяч лет выявлена пространственная неоднородность изменений гидрологии среды, ледовых условий моря и особенности условий среды юго-восточного сектора от остальной части моря. Во время оледенения и дегляциации западная и центральная части моря испытывали сильное влияние

морских льдов, формирующихся в Беринговом и Охотском морях. В юго-восточной части моря в это время значительное влияние на среду и продуктивность поверхностных вод оказывали также периодические сбросы айсбергов в связи с усилением образования ледников на Камчатке и схода их в море на юго-западном побережье Камчатки. При этом некоторое распреснение поверхностных вод при сбросе айсбергов распространялось во всем море посредством циклонической циркуляции вод, но присутствие самих айсбергов было, вероятно, ограничено восточной частью моря.

Благодарность. Материал работы был получен, обработка и написан при поддержке гостемы №124022100084-8 Минобрнауки РФ.

Литература

1. Мелекесцев И.В., 1974. Основные этапы формирования современного рельефа Курило-Камчатского региона. В: Лучицкий И.В. (ред.), Камчатка, Курильские и Командорские острова, с. 337-344. Наука, Москва.
2. Cheng, H., et al. 2016, The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations, *Nature*, 534, 640-648.
3. Gebhardt, H. et al. Paleonutrient and productivity records from the subarctic North Pacific for Pleistocene glacial terminations I to V. *Paleoceanography* 23, PA4212, (2008).
4. Gorbarenko S. A. et al. Late Pleistocene–Holocene oceanographic variability in the Okhotsk Sea: geochemical, lithological and paleontological evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, V 209, Issues 1-4, 2004, P.281-301.
5. Gorbarenko S. A., et al. Responses of the Okhotsk Sea environment and sedimentology to global climate changes at the orbital and millennial scale during the last 350kyr *Deep-Sea Research II* 61-64 (2012) P. 73–84
6. Gorbarenko, S.A., et al. 2014. The response of the Okhotsk Sea environment to the orbital-millennium global climate changes during the Last Glacial Maximum, deglaciation and Holocene. *Global and Planetary Change* 116, 76–90.
7. Gorbarenko S.A., et al. Millennium scale environment changes of the Okhotsk Sea during last 80 kyr and their phase relationship with global climate changes. *J of Oceanography*, Vol. 63, No. 4, pp. 609-623, 2007.
8. Gorbarenko, S.A., et al. 2022. Iceberg discharge events in the northwest Pacific and related sequence of Kamchatka glaciations over the last 190 kyr. *Quaternary Science Reviews*. 278. 107349. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107349>
9. Katsumata, K., and Yasuda, I., 2010. Estimates of non-tidal exchange transport between the Sea of Okhotsk and the North Pacific. *J. Oceanogr.* 66 (4), 489–504. <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0041-9>
10. Lisiecki, L. E., and Stern, J. V. (2016). Regional and global benthic $\delta^{18}\text{O}$ stacks for the last glacial cycle, *Paleoceanography*, 31, 1368–1394, doi:10.1002/2016PA003002
11. Nürnberg D, Dethleff D, Tiedemann R., Kaiser A., Gorbarenko S. 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*, 310 (2011) 191–205.
12. Sakamoto T., et al. Ice-rafted debris (IRD) -based sea-ice expansion events during the past 100 kyrs in the Okhotsk Sea, *Deep Sea Research II*, 2005, Vol. 52, Nos. 16-18, P. 2275-2301.
13. Sakamoto, T., et al. 2006. Millennial-scale variations of sea ice expansion in the southwestern part of the Okhotsk Sea during the past 120 kyr: age model and ice-rafted debris in IMAGES Core MD01-2412. *Global and Planetary Change* 53, 58-77.
14. Seierstad, I.K., et al., Consistently dated records from the Greenland GRIP, GISP2 and NGRIP ice cores for the past 104 ka reveal regional millennial-scale $\delta^{18}\text{O}$ gradients with possible Heinrich event imprint. *Quaternary Science Reviews*. 106 (2014) 29-46. doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.032
15. Velivetskaya, T.A., Ignatiev, A.V., Gorbarenko, S.A., 2009. Carbon and oxygen isotope microanalysis of carbonate. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 23, 2391–2397. <https://doi.org/10.1002/rcm.3989>.