

ОБОБЩЕННАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПОХОЛОДАНИЙ МОРСКИХ-ПРИБРЕЖНЫХ РЕГИОНОВ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В ГОЛОЦЕНЕ И ОБУСЛАВЛИВАЮЩИЕ ИХ МЕХАНИЗМЫ

Горбаренко С.А., Босин А.А.,

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

Аннотация. Многочисленные исследования направлены на понимание изменений климата в голоцене и климатических событий тысячелетнего масштаба. Эти события, в том числе похолодание, произошедшее 8,2 тыс. лет назад, климатический оптимум голоцена, средневековая климатическая аномалия и малый ледниковый период, хорошо известны в научном сообществе. Однако хронология и причины событий столетнего масштаба в голоцене остаются предметом дискуссий. В данной работе проанализирован ряд детальных и хорошо датированных записей, подробно описывающих изменения климата в Северном полушарии в течение голоцена. На основе этих данных мы получили обобщенный стек климатической изменчивости для северного полушария за последние 10 тыс. лет. С помощью климатического стека было выделено 15 столетних похолоданий. Для понимания механизмов, стоящих за этими изменениями климата, мы сопоставили их с потенциальными факторами, влияющими на климат: солнечная активность, извержения вулканов, колебаниями внутритропической зоны конвергенции и изменчивостью Эль-Ниньо - Южного колебания. Наши результаты показывают, что некоторые из похолоданий совпадают с минимумами солнечной активности, подтверждая их тесную связь. Однако влияние эксплозивного вулканизма также было значительным фактором для большинства выделенных событий. Обобщенный климатический стек и выделенные события дают подробную хронологию похолоданий столетнего масштаба в северном полушарии и понимание механизмов, стоящих за ними.

Ключевые слова: изменения климата, климатические факторы, реконструкция палеотемпературы

SINTEZIED SEQUENCE OF COOLINGS IN THE MARINE-COASTAL REGIONS OF THE NORTHERN HEMISPHERE IN THE HOLOCENE AND THE MECHANISMS RESPONSIBLE FOR THEM

Gorbarenko S.A., Bosin A.A.,

V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences

Abstract. Numerous studies are aimed at understanding Holocene climate change and millennial climate events. These events, including the 8,200-year-old cooling event, the Holocene Climatic Optimum, the Medieval Climate Anomaly, and the Little Ice Age, are well known in the scientific community. However, the chronology and drivers of centennial events in the Holocene remain a matter of debate. This study analyzes a number of detailed and well-dated records of detailing climate change in the Northern Hemisphere during the Holocene. Based on these data, we obtained a generalized stack of climate variability for the Northern Hemisphere over the past 10 thousand years. Using the climate stack, 15 centennial cold events were identified. To understand the mechanisms behind these climate changes, we correlated them with potential climate drivers: solar activity, volcanic eruptions, Intertropical Convergence Zone oscillations, and El Niño-

Southern Oscillation variability. Our results show that some of the cold events coincide with solar activity minima, confirming their close relationship. However, the influence of explosive volcanism was also a significant factor for most of the identified events. The generalized climate stack and highlighted events provide a detailed chronology of centennial cold events in the Northern Hemisphere and insight into the mechanisms behind them.

Keywords: *climate change, climate forcings, paleotemperature reconstruction*

Введение. Теплый климат современного межледниковья, начавшегося 11,7 тыс.л.н. после похолодания поздний дриас [1], способствовал интенсивному развитию человеческого общества. Климат голоцена не был стабильным, хотя резких или сильных климатических изменений со времени последнего оледенения не произошло [8]. Изменения климата с десятилетними, столетними и тысячелетними периодичностями привели к значительным преобразованиям окружающей среды в различных регионах [9, 25]. Некоторые из этих сдвигов привели к катастрофическим последствиям, таким как хорошо задокументированный коллапс неолитической культуры в Китае и коллапс бронзового века в Восточном Средиземноморье («темные века»), примерно 4 тыс. лет назад и 3,15-2,95 тыс. лет назад соответственно [18, 27]. Поэтому понимание как локальных, так и глобальных климатических изменений в период голоцена, а также причин, их вызывающих, имеет первостепенное значение для социального и экономического развития человеческого общества и прогнозирования значительных изменений климата в будущем.

К настоящему времени научное сообщество получило огромное количество данных о региональных колебаниях климата на протяжении голоцена посредством комплексных исследований, охватывающих озера, торфяники, годовичные кольца деревьев, континентальные отложения на Евразийском и американском континентах, а также керны ледяных и морских отложений [5, 11, 15]. На основе этих данных сделано несколько обобщений об изменениях климата на протяжении голоцена [16, 17, 24, 28]. Однако к настоящему времени отсутствует общепринятая концепция столетних изменений температуры морских-прибрежных регионов северного полушария в голоцене [17, 19].

Материалы и методы. В данной работе мы обобщили записи изменений температуры морских-прибрежных регионов северного полушария в голоцене на основе обзора [17] для 30–60° с.ш. и дополнительных семи опубликованных записей изменений климата за последние 10 тыс. лет с очень высоким временным разрешением и надежной возрастной моделью, которые также в основном связаны с изменениями температуры северного полушария (Рис. 1). При этом мы использовали оригинальные возрастные модели указанных записей изменений температуры и климата с незначительной частичной коррекцией двух из них.

Таблица 1

Наиболее значительные похолодания климата и уменьшения температуры морских-прибрежных регионов северного полушария за последние 10 тыс. лет.

Событие	Период, тыс.л.н.
0a	0.36-0.24
0b	0.63-0.44
1a	0.97-0.81
1b	1.33-1.10
1c	1.87-1.66
1d	2.25-2.09
2a	2.94-2.68
2b	3.56-3.41
3a	3.92-3.73
3b	4.52-4.07

4a	5.62-5.32
4b	6.61-6.26
4c	7.00-6.76
5	8.49-8.16
6	9.08-8.72

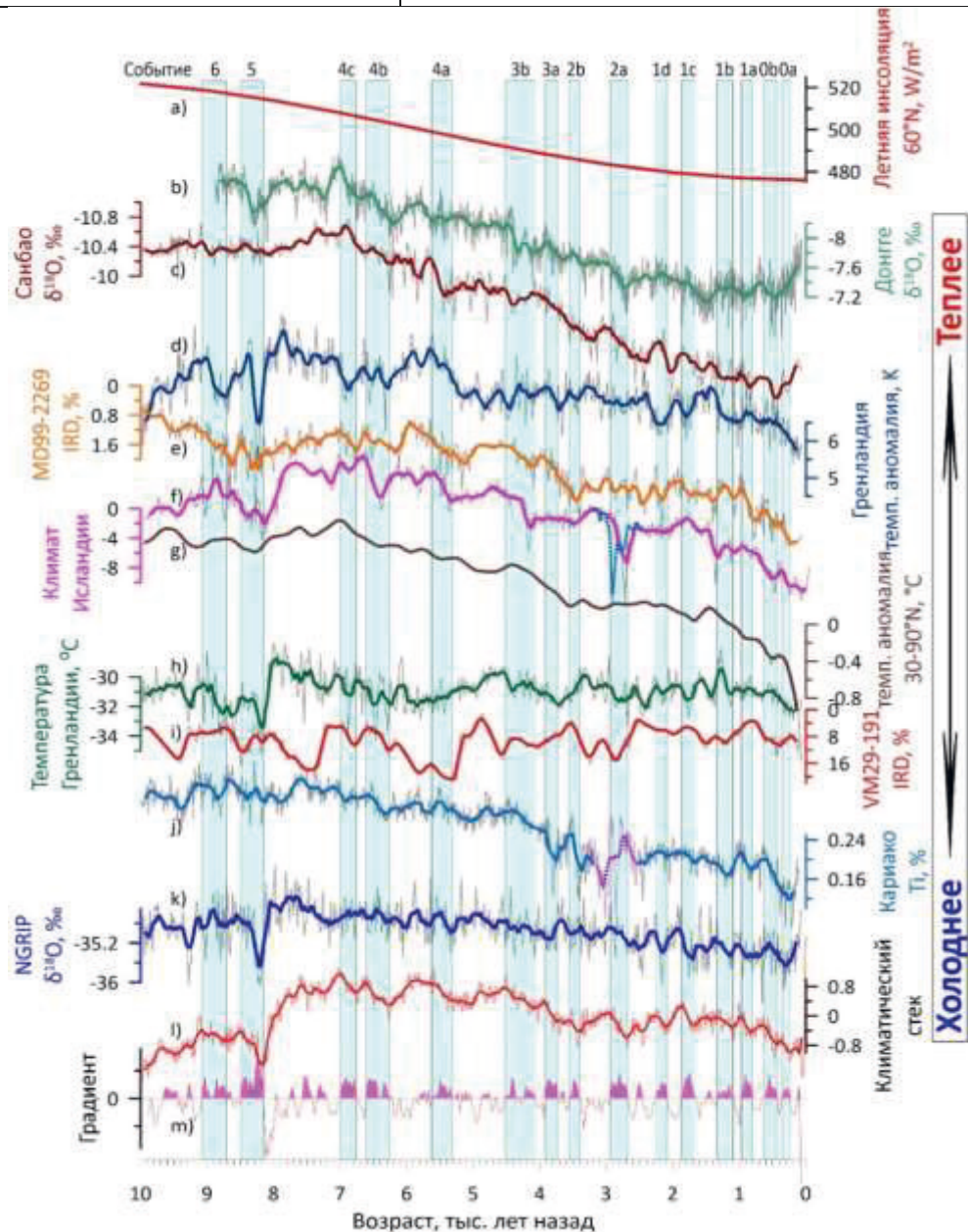


Рис. 1. Записи, использованные для построения климатического стека морских-прибрежных регионов северного полушария, и выделенные похолодания. а) летняя солнечная инсоляция на 60° с.ш. [2]; б) изотопно-кислородные записи сталагмитов из пещеры Донгге [12] и в) пещеры Санбао [10]; д) и h) записи температуры Гренландии [11, 15]; д) и i) записи IRD в кернах осадков Северной Атлантики MD99-2269 [21] и VM29-191 [4]; f) комплексные климатические данные исландских озер [13]; ж) зональный стек температур для 30-60° с.ш. [17]; j) Содержание титана в осадочных отложениях ODP 1002 из северной части бассейна Кариакко [14]; л) $\delta^{18}\text{O}$ ледяного керна Гренландии NGRIP [23]; 1) обобщенный климатический стек; м) градиент изменения климатического стека.

Для построения климатического стека все указанные записи были предварительно линейно интерполированы с 10-летним разрешением, были исключены линейные тренды и проведена нормировка путем вычитания среднего значения и деления на стандартное отклонение. Полученная обобщенная кривая отображающая изменения температуры в морской-прибрежной зоне северного полушария (климатический стек) была сглажена с использованием скользящего окна шириной 150 лет. На основе полученного климатического стека мы выделили периоды 15-ти наиболее значительных похолоданий (периоды с уменьшением температуры). Границы событий выделялись на основе отрицательного градиента климатического стека (Таблица).

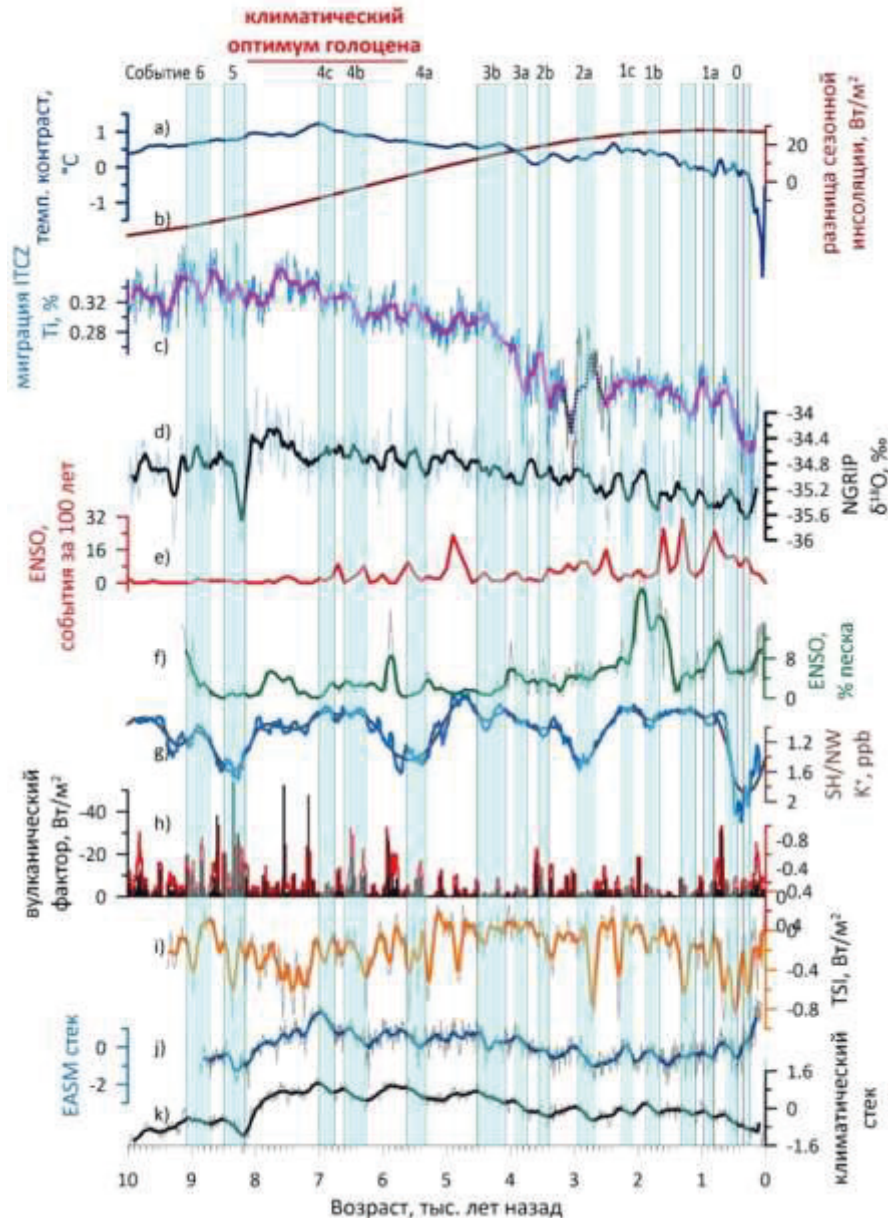


Рис. 2. Сопоставление выделенных событий с потенциальными климатическими факторами. а) Разница температур между северным и южным полушариями [17] для полярных областей 30° с.ш. и 30° ю.ш.; б) разница инсоляции между декабрем и июнем в тропических широтах [3]; в) запись о миграции ИТЦЗ [14]; д) $\delta^{18}\text{O}$ ледяного керна Гренландии NGRIP [23]; е) и ф) записи изменчивости ENSO [7, 22]; г) изменения активности сибирского антициклона и западных ветров [20]; з) вулканический фактор [15]; и) TSI [26] ж) стек EASM [10, 12]; к) синтезированный климатический стек.

Результаты и их обсуждение. В научном сообществе рассматривались несколько потенциальные механизмов столетних изменений климата и похолоданий в голоцене: изменчивость общего солнечного излучения (TSI) [26], крупные извержения вулканов [15], изменчивость Эль-Ниньо - Южного колебания (ENSO) [6] и меридиональная миграция Внутритропической зоны конвергенции (ITCZ) [14]. Выявленная нами последовательность столетних похолоданий позволяет определить наиболее важные факторы, воздействующие на климат и на падение температуры морских-прибрежных регионов северного полушария за последние 10 тыс. лет (Рис. 1).

Вероятно, события 5 и 6 были вызваны наложением минимумов TSI одновременно с сильной активизацией эксплозивного вулканизма, сопровождавшейся заметными выбросами вулканических аэрозолей в стратосферу, каждое из которых способствовало снижению притоку солнечной радиации на поверхность Земли (Рис. 2).

Период между событиями 5 и 4а (8,19-5,62 тыс. лет назад), так называемый климатический оптимум голоцена [15, 17], демонстрирует выраженные температурные контрасты между северным и южным полушариями в полярных регионах выше 30° с.ш. и ю.ш., и, согласно реконструкции Маркотт и др. [17], указывает на период значительного потепления северного полушария (рис. 1). Однако, согласно полученному климатическому стеку, климатический оптимум голоцена прерывался событиями 4с и 4б, которые сопровождались одновременным значительным смещением ITCZ на юг, уменьшением температурного контраста между северным и южным полушариями и ослаблением восточноазиатского летнего муссона (EASM), что, вероятно, связано с похолоданием в тропической зоне и некоторым усилением ENSO (Рис. 2). Событие 4а (5,6-5,22 тыс. л.н.) также сопровождалось повышенной эксплозивной вулканической активностью и значительными минимумами TSI, завершившими климатический оптимум голоцена, что, вероятно, было связано с совместным влиянием солнечного фактора и вулканизма (Рис. 2).

Последующие события 3б, 3а и 2б были связаны с небольшим уменьшением TSI, однако они совпали с заметным смещением ITCZ к югу, ослаблением EASM и уменьшением температурного контраста между северным и южным полушариями. Эти важные изменения климатической системы Земли на протяжении 4,52-3,41 тыс. лет назад также сопровождались значительным усилением изменчивости ENSO [7, 22], что привело к значительной перестройке климата голоцена и коллапсу неолитической культуры в Китае [27].

Событие 2а (2,94-2,68 тыс. лет назад) произошло во время сильного минимума солнечной активности Гомера и пика активности сибирского антициклона и западных ветров в циркуляции атмосферы северного полушария, что привело к похолоданию климата, сопровождавшегося падением температуры в Гренландии и ослаблением EASM. Последующие события 0б и 0а сопровождались минимумами приходящей солнечной инсоляции (минимумы Шпёрера и Маундера) и усилением изменчивости ENSO. Эти внешние и внутренние воздействия, вероятно, были основными факторами похолодания климата Земли за последние 2000 лет. Событиям 0б и 0а, также предшествовало усиление вулканической активности, что привело к формированию известного малого ледникового периода (Рис. 2).

Выводы. Климатический стек для северного полушария на основе детальных и хорошо датированных записей изменения климата позволяет надежно определять похолодания столетнего масштаба. Сопоставление выделенных событий с основными потенциальными климатическими факторами позволяет лучше понять механизмы, стоящие за этими изменениями климата.

Благодарность. Материал работы был получен при поддержке гостемы №124022100084-8 Минобрнауки РФ, обработка и написание статьи сделаны при поддержке гранта РФФ 22-17-0011

Литература

1. Alley R. B. [и др.]. Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event // *Nature*. 1993. № 6420 (362). С. 527–529.
2. Berger A. L. Long-Term Variations of Caloric Insolation Resulting from the Earth's Orbital Elements // *Quaternary Research*. 1978. № 02 (9). С. 139–167.
3. Berger A. L., Loutre M.-F., Tricot C. Insolation and Earth's orbital periods // *Journal of Geophysical Research*. 1993. № D6 (98). С. 10341.
4. Bond G. C. [и др.]. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene // *Science (New York, N.Y.)*. 2001. № 5549 (294). С. 2130–6.
5. Brooks S. J. [и др.]. Holocene environmental change in Kamchatka: A synopsis // *Global and Planetary Change*. 2015. (134). С. 166–174.
6. Cane M. A. The evolution of El Niño, past and future // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. № 3–4 (230). С. 227–240.
7. Conroy J. L. [и др.]. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment record // *Quaternary Science Reviews*. 2008. № 11–12 (27). С. 1166–1180.
8. Dansgaard W. [и др.]. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record // *Nature*. 1993. № 6434 (364). С. 218–220.
9. Denton G. H., Karlén W. Holocene Climatic Variations—Their Pattern and Possible Cause // *Quaternary Research*. 1973. № 2 (3). С. 155–205.
10. Dong J. [и др.]. A high-resolution stalagmite record of the Holocene East Asian monsoon from Mt Shennongjia, central China // *The Holocene*. 2010. № 2 (20). С. 257–264.
11. Döring M., Leuenberger M. C. Comparison of Holocene temperature reconstructions based on GISP2 multiple-gas-isotope measurements // *Quaternary Science Reviews*. 2022. (280). С. 107274.
12. Dykoski C. A. [и др.]. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. № 1–2 (233). С. 71–86.
13. Geirsdóttir Á. [и др.]. Abrupt holocene climate transitions in the northern north atlantic region recorded by synchronized lacustrine records in iceland // *Quaternary Science Reviews*. 2013. (70). С. 48–62.
14. Haug G. H. [и др.]. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. // *Science (New York, N.Y.)*. 2001. № 5533 (293). С. 1304–8.
15. Kobashi T. [и др.]. Volcanic influence on centennial to millennial Holocene Greenland temperature change // *Scientific Reports*. 2017. № 1 (7). С. 1441.
16. Mann M. E. [и др.]. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008. № 36 (105). С. 13252–13257.
17. Marcott S. A. [и др.]. A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years // *Science*. 2013. № 6124 (339). С. 1198–1201.
18. Margaritelli G. [и др.]. Persistent warm Mediterranean surface waters during the Roman period // *Scientific Reports*. 2020. № 1 (10). С. 10431.
19. Marsicek J. [и др.]. Reconciling divergent trends and millennial variations in Holocene temperatures // *Nature*. 2018. № 7690 (554). С. 92–96.
20. Mayewski P. A. [и др.]. Holocene climate variability // *Quaternary Research*. 2004. № 3 (62). С. 243–255.
21. Moros M. [и др.]. Holocene history of drift ice in the northern North Atlantic: Evidence for different spatial and temporal modes // *Paleoceanography*. 2006. № 2 (21). С. PA2017.
22. Мой С. М. [и др.]. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial

timescales during the Holocene epoch // *Nature*. 2002. № 6912 (420). С. 162–165.

23. Rasmussen S. O. [и др.]. 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 // *Quaternary Science Reviews*. 2014. (106). С. 14–28.

24. Solomina O. N. [и др.]. Holocene glacier fluctuations // *Quaternary Science Reviews*. 2015. (111). С. 9–34.

25. Stager J. C., Cumming B., Meeker L. A High-Resolution 11,400-Yr Diatom Record from Lake Victoria, East Africa // *Quaternary Research*. 1997. № 1 (47). С. 81–89.

26. Steinhilber F. [и др.]. 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. № 16 (109). С. 5967–5971.

27. Sun Q. [и др.]. Climate as a factor for Neolithic cultural collapses approximately 4000 years BP in China // *Earth-Science Reviews*. 2019. (197). С. 102915.

28. Wanner H. [и др.]. Holocene climate variability and change; a data-based review // *Journal of the Geological Society*. 2015. № 2 (172). С. 254–263.