

**ПАЛЕОАНАЛОГИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА –
МЕЖЛЕДНИКОВЬЯ MIS11 и MIS19 (КРАТКИЙ ОБЗОР)****О.О. Рыбак^{1,2,3}, Е.А. Рыбак²**¹Институт водных проблем РАН, г. Москва, ул. Губкина, 3²Институт природно-технических систем, Севастополь, ул. Ленина, 28³Кабардино-Балкарский государственный университет,
г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173*E-mail: o.o.rybak@gmail.com*

Оценка последствий будущих изменений климата для окружающей среды является одной из наиболее актуальных задач современной климатологии. Наряду с широким применением методов математического моделирования, исследователи обращаются к поиску аналогов современного климата в прошлом. Логично предположить, что сочетание орбитальных факторов в прошлом обуславливало сходные климатические условия, и, собирая косвенные данные об окружающей среде того времени, касающиеся, прежде всего, уровня моря, можно проецировать их в будущее. В течение последнего миллиона лет климат Земли претерпел несколько ледниково-межледниковых циклов. В качестве аналогов современного межледниковья (голоцена), которое началось приблизительно 10 тыс. лет назад, рассматривают теплые периоды (Морские изотопные стадии, Marine Isotope Stages) MIS5, MIS11 и MIS19 (соответственно, 115–130, 360–420 и 740–780 тыс. лет назад). Одна из угроз, с которой человечеству неизбежно придется столкнуться в будущем – это повышение глобального уровня моря по причине комплексных и многофакторных последствий потепления климата. Негативные последствия повышения уровня моря, которое оценивается в десятки сантиметров до конца текущего столетия, заключаются в первую очередь в подтоплении густонаселенных прибрежных территорий. Если следовать палеоаналогам современного климата, то на максимуме потепления в течение MIS11 уровень моря по наиболее обоснованным оценкам поднимался на 6–13 м относительно современной отметки. Этот диапазон свидетельствует о том, что помимо существенного сокращения масштабов Гренландского ледникового щита, вполне вероятно происходил также распад Западно-Антарктического ледникового щита.

Ключевые слова: плейстоцен, межледниковья, климатические циклы, палеоклиматология, палеоаналог, уровень моря.

Поступила в редакцию: 27.06.2024. После доработки 20.07.2024. Принята к печати: 27.09.2024.

Введение. Одно из направлений в современной теоретической климатологии – это проецирование прошлых изменений климата и их последствий в будущее. Поиск аналогов современных изменений климата в прошлых межледниковых периодах направлен на совершенствование нашего понимания механизмов климатической изменчивости в масштабах тысячелетий, а с более практической точки зрения позволяет оценить последствия этих изменений на окружающую среду и возможную хронологию этих изменений.

Для этого целесообразно использовать аналоги текущего состояния климата в прошлом. В течение последнего миллиона лет климат Земли претерпел

несколько ледниково-межледниковых циклов, однако лишь межледниковья (Морские изотопные стадии, Marine Isotope Stages) MIS5, MIS11 и MIS19, можно рассматривать в качестве относительно полноценных кандидатов на роль палеоаналогов современного оледенения (голоцен). MIS11 считается самым длинным межледниковьем плейстоцена, длительностью 60 тысяч лет (420–360 тыс. лет назад), что значительно дольше, чем, например, более «теплое» межледниковье MIS5 (115–130 тыс. лет назад) или чем голоцен (последние 10 тыс. лет). Подъем глобального уровня моря по причине комплексных и многофакторных последствий потепления климата – это одна из угроз, с которой челове-

ству неизбежно придется столкнуться в будущем. Ожидается, что фиксируемые в настоящее время и кажущиеся незначительными скорости роста, исчисляемые миллиметрами в год, к концу текущего столетия составят десятки сантиметров. Хотя разброс прогностических значений достаточно велик, не учитывать или недоучитывать последствия роста уровня моря на инфраструктуру прибрежных регионов, на экономику и социальную сферу, было бы крайне неосмотрительно. Заметим, что в последние несколько лет исследователи стали строить проекции глобального уровня моря и за горизонтом 2100 г. Может показаться, что заблаговременность прогнозов, превышающих несколько десятилетий, представляет лишь академический интерес, однако в действительности осознание потенциальных угроз, хотя и в отдаленном будущем, даст возможность минимизировать вероятный ущерб от роста уровня моря, в частности, от потенциального затопления обширных территорий.

Естественно, что проекции уровня моря непосредственным образом связаны с климатическими прогнозами. Для оценки будущих климатических изменений на длительную перспективу, порядка сотен и тысяч лет, их механизмов и последствий, для выделения антропогенной составляющей этих изменений, наряду с методами математического моделирования целесообразно использовать сравнение с аналогами текущего состояния климата и его прошлых характеристик. В течение долгого времени считалось, что ближайшим аналогом современного межледникового (голоцена) является период потепления MIS5, 115–130 тыс. лет назад (рис. 1). Тем не менее, существует ряд отличий между голоценом и MIS5, прежде всего в величинах орбитальных параметров (среди последних стоит отметить различия в величинах эксцентриситета, и, как следствие, в значениях инсоляции) [1]. В качестве двух других палеоаналогов рассматриваются (о чем было упомянуто выше) эпохи MIS11 и MIS19 (последнее датируется периодом времени приблизительно

но 740–780 тыс. лет назад). О климатических изменениях в течение MIS19 известно немного в силу малого объема косвенных данных по сравнению с MIS5 и MIS11. Таким образом, учитывая некоторые несоответствия во внешних факторах климатических изменений между MIS5 и голоценом, усилия палеоклиматологов в изучении палеоаналогов современного климата постепенно концентрируются на исследовании разнообразных косвенных данных, относящихся к MIS11.

Орбитальные факторы климатических изменений в течение MIS11. Орбитальные параметры Земли, от которых зависит распределение солнечной энергии на поверхности планеты, изменялись на протяжении голоцена (рис. 1) и будут продолжать изменяться в течение ближайших тысячелетий таким же образом, как это происходило в эпоху MIS11. Это делает MIS11 «орбитальным аналогом» голоцена и позволяет рассматривать сценарий климатических изменений в ту эпоху в качестве потенциального аналога естественных глобальных изменений климата, ожидающих нашу планету в ближайшем будущем [2]. Считается, что длительность MIS11 (приблизительно 60 тыс. лет) объясняется, в первую очередь, низким значением эксцентриситета Земной орбиты в течение продолжительного отрезка времени [3–5]. Больше, чем в голоцене, значение склонения Земной орбиты объясняет пониженную инсоляцию в полярных областях, что компенсируется увеличенной концентрацией парниковых газов.

Изотопный состав льда, полученного в результате глубокого бурения Антарктического ледникового щита на станции Купол Конкордия, свидетельствует о сопоставимой или несколько более высокой приземной температуре воздуха в течение MIS11 по сравнению с современным уровнем и близкую к современной концентрацию парниковых газов [6, 7]. Более того, MIS11 характеризуется несколько более высокой температурой поверхности океана в высоких широтах, выраженной термохалинной циркуляцией, распространением коралловых рифов [8].

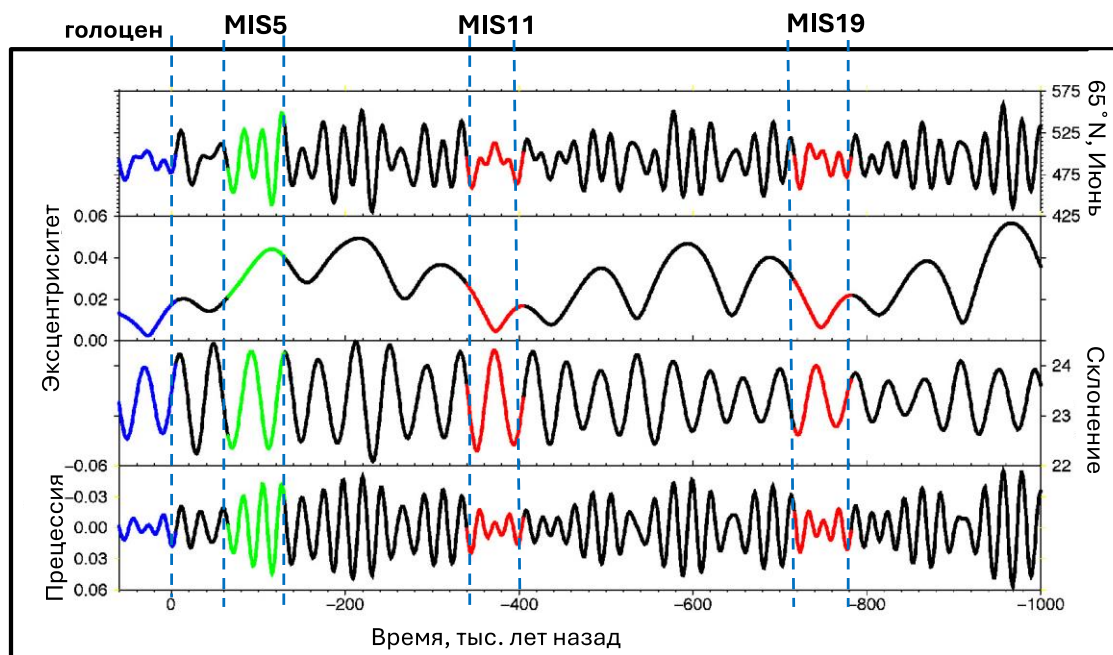


Рис. 1. Циклические изменения инсоляции на 65° с. ш. и параметров орбиты Земли (эксцентриситет, прецессия и склонение) за последние 1 млн лет. Красные участки соответствующих кривых являются ближайшими аналогами (MIS11 и MIS19) орбитальной конфигурации в настоящее время и в ближайшем будущем (синие); зеленая часть соответствует последнему (эмскому, MIS5) межледниковью, маловероятному орбитальному аналогу современного межледниковья (голоцен) (адаптировано из [1])

Fig. 1. Cyclic changes in insolation at 65° N. and parameters of the Earth's orbit (eccentricity, precession and declination) over the past 1 million years. The red sections of the corresponding curves are the closest analogues (MIS11 and MIS19) of the orbital configuration at the present time and in the near future (blue); the green part corresponds to the last (Eemian, MIS5) interglacial, an unlikely orbital analogue of the modern interglacial (Holocene)(adapted from [1])

Глобальный уровень моря в течение MIS11. Наиболее характерное отличие MIS11 от современного состояния Земной системы состоит в том, что средний глобальный уровень моря в течение длительного периода (вероятно, в течение нескольких тысяч лет), как считается, был выше современного. Несмотря на продолжающиеся дискуссии о том, насколько уровень моря превышал современные отметки, понимание источников этого повышения, его механизмов, его скорости и последовательности событий, которые привели к его колебаниям, представляют несомненный интерес с точки зрения современных и будущих изменений окружающей среды. Поняв, что послужило причиной повышения уровня моря выше современных отметок приблизительно 398–408 тыс. лет назад при внешних (астрономиче-

ских) факторах, в целом, соответствующим современным, мы сможем спроецировать события MIS11 на текущее межледниковье. Продолжительность MIS11 дает возможность построить возможные сценарии изменения глобального уровня моря в будущем и сопоставить их с модельными оценками.

Оценки повышения уровня моря в течение MIS11 разнятся в довольно широких пределах. Наиболее обоснованным представляется диапазон от 6 до 13 м по отношению к современному доиндустриальному уровню [9], хотя максимальные оценки превышают +20 м [10–12]. Все оценки, по мнению авторов, опираются на бесспорные данные полевых исследований. Действительно, идентифицированные свидетельства существенного повышения уровня моря в среднем плейстоцене встречаются в раз-

ных точках планеты [11] от северо-западного побережья Аляски [13] до Багамских и Бермудских островов [10] и Гаваев [14]. Наиболее известные и цитируемые работы посвящены Багамам (+22 м) и Бермудам (+18,5 м). Ранее, в [8] была выполнена оценка исправленного на тектонические вертикальные движения подъем уровня моря в +23 м в Южной Британии [15].

Авторы [8], тем не менее, не согласны с оценками в отношении Багамских и Бермудских островов, аргументируя тем, что они находились на периферии «вспучивания» земной коры, которая деформировалась под весом древнего Лаврентийского ледникового щита. В результате они испытывали поднятие, по всей видимости, в течение каждого из межледниковий [16]. После введения соответствующих поправок на изостатическое приспособление, и, принимая во внимание неопределенность в результатах модельных расчетов, получается, по их мнению, более реалистичный разброс от +6 до +13 м, который сегодня в целом считается наиболее вероятным диапазоном. Почти весь этот подъем уровня моря, должно быть, был вызван таянием материкового льда. Термическое расширение океана вряд ли способствовало увеличению уровня более чем на несколько дециметров. Например, авторы [17] оценивают этот вклад в $0,3 \pm 0,1$ м для пика последнего межледниковья (MIS5e), что вполне можно соотнести с пиком потепления MIS11. Ожидается, что полное таяние всех горных ледников и небольших ледяных шапок составит $0,32 \pm 0,08$ м повышения уровня моря [18]. Аналогичные предположения можно сделать и в отношении MIS11.

Поскольку основной вклад в повышение уровня моря был, по-видимому, следствием деградации материковых ледниковых щитов, то естественно возникает ряд вопросов, касающихся как величины этих вкладов, так и их синхронности (или асинхронности). Если считать, что ледниковые щиты Северного полушария (кроме Гренландского) полностью растаяли и отбросить термическое расширение вод океана и вклад

талой воды горных ледников и ледниковых куполов (совокупный вклад этих источников едва ли превышает 1 м [17–19]), то остающиеся от 5 до 12 м могли поступить только в результате таяния и механического разрушения части покровного оледенения Гренландии (максимальный вклад 6,1 м согласно [20] и Западной Антарктиды (максимум 3,3 м [21]). Речь, в первую очередь, идет именно о Западно-Антарктическом ледниковом щите, поскольку значительные его участки лежат ниже уровня Мирового океана и, вследствие этого, являются потенциально нестабильными, то есть могут быть подвержены механическому разрушению в течение довольно быстрого по геологическим меркам времени.

Очевидно, что нижняя граница отметки подъема уровня моря практически близка к максимально возможному вкладу Гренландского ледникового щита, однако дальнейший подъем возможен лишь при условии, что определенный вклад вносит Антарктический ледниковый щит. Вопрос в том, до какой степени синхронны были изменения ледниковых щитов? Если вклад Гренландии и Западной Антарктиды был асинхронным, разнесенным во времени, тогда со всей очевидностью встает вопрос о частичном распаде некоторых окраинных областей Восточно-Антарктического ледникового щита, основание которых также находится ниже уровня Мирового океана. Ответ на него чрезвычайно важен для понимания будущих тенденций в изменении уровня Мирового океана.

Исследованию MIS11 средствами математического моделирования посвящен ряд работ. Так, используя временные срезы климата MIS11, сгенерированного на модели промежуточной сложности LOVECLIM [5], исследователям удалось объяснить исключительную продолжительность MIS11 по сравнению с другими межледниковьями комбинированным эффектом вариации инсоляции и изменением концентрации CO_2 .

В другом исследовании, сфокусированном на Гренландском ледниковом щите [20], указано на фактор времени, нежели на фактор роста приземной тем-

пературы воздуха, как причину значительного таяния Гренландского ледникового щита. Заметим, что ряд объективно существующих пробелов в нашем понимании закономерностей формирования природных условий MIS11 возможно до известной степени компенсировать знаниями о более близком к нам по времени, хотя и не совпадающим по ряду параметров, межледниковье MIS5. Климат MIS5 был изучен более всесторонне, не в последнюю очередь из-за многочисленных и относительно более надежных палеореконструкций на основании косвенных данных, которое дополнялось многочисленными модельными исследованиями. В частности, неравновесное моделирование промежуточной стадии MIS5e на модели LOVECLIM, интегрированной с моделями ледниковых щитов, было, например, описано в работах [22, 23], в которых были использованы временные срезы климата, сгенерированные на модели общей циркуляции атмосферы и океана и прошедшие процедуру регионализации до пространственного разрешения модели ледникового щита Антарктиды для построения проекций его состояния в относительно более теплых условиях. Заметим, что аналогичные современные модельные исследования, относящиеся к периоду MIS11, включая симуляцию эволюции обоих ледниковых щитов, до сих пор достаточно фрагментарны.

Заключение. В научном сообществе до настоящего времени продолжаются дебаты, посвященные тому, какой из межледниковых периодов плейстоцена может считаться наиболее адекватным аналогом современного потепления климата. В течение длительного времени преобладала точка зрения, что таковым кандидатом может считаться Эемское межледниковье (MIS5, 115–130 тыс. лет назад), однако комбинация орбитальных параметров в то время значительно отличалась от современной. По всей видимости, есть два наиболее вероятных периода в прошлом (MIS11 и MIS19), которые могли бы в достаточной мере послужить прообразом будущих климатических изменений и связанных с ним

прочих изменений в окружающей среде. Проблема осложняется тем, что помимо орбитальных факторов климатических изменений, в настоящее время следует учитывать и рост концентрации парниковых газов вследствие растущего антропогенного воздействия.

При рассмотрении изменений как годовых, так и сезонных температур на всем интервале каждого межледниковья расчеты показывают, что MIS19 является лучшим аналогом голоцена и его естественного ближайшего будущего [23]. Однако крайне скудные косвенные данные об этом периоде времени затрудняют его использование в качестве полноценного палеоаналога современного климата. MIS11 близок к голоцену, если учитывать только воздействие инсоляции, но его длительная высокая концентрация CO₂ делает его теплее, что некоторым образом может послужить проекцией будущих климатических изменений. Из-за большой амплитуды изменений инсоляции, а также более высокой концентрации CO₂ MIS5, как уже было упомянуто, вряд ли можно рассматривать как аналог голоцена. Однако теплый климат MIS5, а также климат MIS11 делают их наиболее близкими к будущему антропогенному теплему климату. Действительно, хотя астрономические факторы MIS5 и длительность MIS11 отличаются от вероятного будущего, а концентрация CO₂ в то время была намного ниже антропогенной концентрации CO₂, существует сходство между этими межледниковьями и антропогенным потеплением с точки зрения климатических обратных связей в региональном масштабе. В обоих случаях наибольшие изменения в климатической системе происходили в высоких широтах обоих полушарий, что связано с положительными откликами температуры снега – льда – альбедо, а сезонная реакция над полярными океанами была асимметрична [23].

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ ИПТС по теме: «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и меха-

низмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан – атмосфера» (№ госрегистрации 124013000609-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prokopenko A.A., Bezrukova E.V., Khursevich G.K. et al. Climate in continental interior Asia during the longest interglacial of the past 500 000 years: the new MIS 11 records from Lake Baikal, SE Siberia // *Climate of the Past*. 2010. Vol. 6. P. 31–48.
2. Котляков В.М. О причинах и следствиях современных изменений климата // *Солнечно-земная физика*. 2012. Вып. 21. С. 110–114.
3. Loutre M.F. Clues from MIS 11 to predict the future climate – a modelling point of view // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 212. P. 213–224. doi:10.1016/S0012-821X(03)00235-8
4. Loutre M.F., Berger A. Marine Isotope Stage 11 as an analogue for the present interglacial // *Global and Planetary Change*. 2003. Vol. 36. P. 209–217. doi:10.1016/S0921-8181(02)00186-8
5. Yin Q., Berger A. Individual contribution of insolation and CO₂ to the interglacial climates of the past 800,000 years // *Climate Dynamics*. 2012. Vol. 38. P. 709–724. doi:10.1007/s00382-011-1013-5
6. Siegenthaler U., Monnin E., Kawamura K. et al. Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO₂ changes during the past millennium // *Tellus*. 2005. Vol. 57B, P. 51–57. doi: 10.3402/tellusb.v57i1.16774
7. Spahni R., Chapellaz J., Stocker T. et al. Atmospheric Methane and Nitrous Oxide of the Late Pleistocene from Antarctic Ice Cores // *Science*. 2005. Vol. 310. P. 1317–1321. doi: 10.1126/science.1120132
8. Droxler A.W., Farrell J.F. Marine isotope stage 11 (MIS11): warm insights for a warm future // *Global and Planetary Change*. 2000. Vol. 24. P. 1–5.
9. Raymo M.E., Mitrovica J.X. Collapse of polar ice sheets during the stage 11 interglacial // *Nature*. 2012. Vol. 483. P. 453–456. doi:10.1038/nature10891
10. Hearty P.J., Kindler P., Cheng H., Edwards R.L. A +20 m middle Pleistocene sea-level highstand (Bermuda and the Bahamas) due to partial collapse of Antarctic ice // *Geology*. 1999. Vol. 27. P. 375–378.
11. Olson S.L., Hearty P.J. A sustained +21 m sea-level highstand during MIS11 (400 ka): Direct fossil and sedimentary evidence from Bermuda // *Quaternary Science Reviews*. 2009. Vol. 28. P. 271–285. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.11.01>
12. van Hengstum P.J., Scott D.B., Javaux E.J. Foraminifera in elevated Bermuda caves provide further evidence for +21 m eustatic sea level during Marine Isotope Stage 11 // *Quaternary Science Reviews*. 2009. Vol. 28. P. 1850–1860.
13. Kaufman D.S., Brigham-Grette J. Aminostratigraphic correlations and paleotemperature implications, Pliocene-Pleistocene high-sea-level deposits, northwestern Alaska // *Quaternary Science Reviews*. 1993. Vol. 12. P. 21–33. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(93\)90046](https://doi.org/10.1016/0277-3791(93)90046)
14. Hearty P.J. The Ka‘ena Highstand of O‘ahu, Hawai‘i: Further Evidence of Antarctic Ice Collapse during the Mid Pleistocene // *Pacific Science*. 2002. Vol. 56. P. 65–81.
15. Bowen D.Q. +23 m Stage 11 sea-level in Southern Britain. In: Marine isotope stage 11 and associated terrestrial records (Ed. by R.Z. Poore, L. Burkle and W.E. McNutly). U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey Open File Report 99-312, 1999. P. 15–17.
16. Mitrovica J.X., Milne G.A. On the origin of late Holocene sea-level highstands within equatorial ocean basins // *Quaternary Science Reviews*. 2002. Vol. 21. P. 2179–2190. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00080-X)
17. McCay N.P., Overpeck J.T., Otto-Bliesner B.L. The role of ocean thermal expansion in Last Interglacial sea level rise // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. L14605. doi:10.1029/2011GL048280
18. Farinotti D., Huss M., Fürst J.J. et al. A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth // *Nature Geoscience*. 2019. Vol. 12. P. 168–

173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>

19. Radić V., Hock R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data // *Journal of Geophysical Research*. 2006. Vol. 115. F01010. doi:10.1029/2009JF001373

20. Robinson A., Alvares-Solas J., Calov R. et al. MIS-11 duration key disappearance of the Greenland ice sheet // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. 16008. doi: 10.1038/ncomms16008

21. Bamber J.L., Riva R.E.M., Vermeersen B.L.A., LeBrocq A.M. Reassess-

ment of the Potential Sea-Level Rise from a Collapse of the West Antarctic Ice Sheet // *Science*. 2009. Vol. 324. P. 901–903.

22. DeConto R.M., Pollard D. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise // *Nature*. 2016. Vol. 531. P. 591–597. <https://doi.org/10.1038/nature17145>

23. Goelzer H., Huybrechts P., Loutre M.-F., Fichet T. Last Interglacial climate and sea-level evolution from a coupled ice sheet–climate model // *The Cryosphere*. 2016. Vol. 12. P. 2195–2213. <https://doi.org/10.5194/cp-12-2195-2016>

PALAEOANALOGUES OF THE MODERN CLIMATE – INTERGLACIALS MIS11 AND MIS19 (A BRIEF REVIEW)

O.O. Rybak^{1,2,3}, E.A. Rybak²

¹Institute of Water Problems of RAS, Moscow, Gubkin St., 3

²Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Lenin St., 28.

³Kabardino-Balkaria State University, Nalchik, Chernyshevskiy St., 173

E-mail: o.o.rybak@gmail.com

Evaluating the consequences of future climate change for the environment is one of the most challenging problems of modern climatology. Along with the widespread use of mathematical modeling methods, researchers apply their efforts to the search for analogues of modern climate in the past. It is logical to assume that the combination of orbital factors in the past caused similar climatic conditions, and by collecting proxy data about the environment of that time, first of all, about the past sea level, it is possible to project past conditions into the future. Over the past million years, the Earth's climate has undergone several glacial-interglacial cycles. Warm periods (Marine Isotope Stages) MIS5, MIS11 and MIS19 (respectively, 115–130, 360–420 and 740–780 thousand years ago) are assumed as analogues of the modern interglacial (Holocene), which began approximately 10 thousand years ago. One of the threats that humanity will inevitably have to face in the future is a rise of the global sea level due to the complex and multifactorial consequences of climate warming. The negative consequences of sea level rise, which is estimated as tens of centimeters by the end of this century, consist primarily of flooding of densely populated coastal areas. Following the paleoanalogues of modern warming, at the maximum warming during MIS11 the sea level rose by 6–13 m relative to the modern level, according to the most reasonable estimates. This range suggests that in addition to the significant degradation of the Greenland Ice Sheet, the West Antarctic Ice Sheet is likely to have collapsed, too.

Keywords: Pleistocene, interglacial, climatic cycles, palaeoclimatology, palaeoanalogue, sea level.

REFERENCES

1. Prokopenko A.A., Bezrukova E.V., Khursevich G.K., Solotchina E.P., Kuzmin M.I., and Tarasov P.E. Climate in continental interior Asia during the longest interglacial of the past 500 000 years: the new MIS 11 records from Lake Baikal, SE Siberia. *Climate of the Past*, 2010, Vol. 6, pp. 31–48.

2. Kotliakov V.M. O prichinakh i sledstviyakh sovremennykh ismeneniy klimata (On the reasons and consequences of the climate change). *Solnechno-zemnaya fizika*, 2012, Issue 21, pp. 110–114.

3. Loutre M.F. Clues from MIS 11 to predict the future climate – a modelling point of view. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, Vol. 212, pp. 213–224. doi:10.1016/S0012-821X(03)00235-8

4. Loutre M.F. and Berger A. Marine Isotope Stage 11 as an analogue for the present interglacial. *Global and Planetary Change*, 2003, Vol. 36, pp. 209–217. doi:10.1016/S0921-8181(02)00186-8

5. Yin Q. and Berger A. Individual contribution of insolation and CO₂ to the interglacial climates of the past 800,000 years. *Climate Dynamics*, 2012, Vol. 38, pp. 709–724. doi:10.1007/s00382-011-1013-5
6. Siegenthaler U., Monnin E., Kawamura K., Sphanni R., Schwander J., Stauffer B., Stocker T.F., Barnola J.-M., and Fischer H. Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO₂ changes during the past millennium. *Tellus*, 2005, Vol. 57B, pp. 51–57. doi:10.3402/tellusb.v57i1.16774
7. Spahni R., Chapellaz J., Stocker T., Loulergue L., Hausammann G., Kawamura K., Flückiger J., Schwander J., Raynaud D., Masson-Delmotte V., and Jouzel J. Atmospheric Methane and Nitrous Oxide of the Late Pleistocene from Antarctic Ice Cores. *Science*, 2005, Vol. 310, pp. 1317–1321. doi:10.1126/science.1120132
8. Droxler A.W. and Farrell J.F. Marine isotope stage 11 (MIS11): warm insights for a warm future. *Global and Planetary Change*, 2000, Vol. 24, pp. 1–5.
9. Raymo M.E. and Mitrovica J.X. Collapse of polar ice sheets during the stage 11 interglacial. *Nature*, 2012, Vol. 483, pp. 453–456. doi:10.1038/nature10891
10. Heart P.J., Kindler P., Cheng H., and Edwards R.L. A +20 m middle Pleistocene sea-level highstand (Bermuda and the Bahamas) due to partial collapse of Antarctic ice. *Geology*, 1999, Vol. 27, pp. 375–378.
11. Olson S.L. and Hearty P.J. A sustained +21 m sea-level highstand during MIS11 (400 ka): Direct fossil and sedimentary evidence from Bermuda. *Quaternary Science Reviews*, 2009, Vol. 28, pp. 271–285. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.11.01>
12. van Hengstum P.J., Scott D.B., and Javaux E.J. Foraminifera in elevated Bermuda caves provide further evidence for +21 m eustatic sea level during Marine Isotope Stage 11. *Quaternary Science Reviews*, 2009, Vol. 28, pp. 1850–1860.
13. Kaufman D.S. and Brigham-Grette J. Aminostratigraphic correlations and paleotemperature implications, Pliocene-Pleistocene high-sea-level deposits, northwestern Alaska. *Quaternary Science Reviews*, 1993, Vol. 12, pp. 21–33. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(93\)90046](https://doi.org/10.1016/0277-3791(93)90046)
14. Hearty P.J. The Ka'ena Highstand of O'ahu, Hawai'i: Further Evidence of Antarctic Ice Collapse during the Mid Pleistocene. *Pacific Science*, 2002, Vol. 56, pp. 65–81.
15. Bowen D.Q. +23 m Stage 11 sea-level in Southern Britain. In: Marine isotope stage 11 and associated terrestrial records (Ed. by R.Z. Poore, L. Burkle and W.E. McNutly). U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey Open File Report 99-312, 1999, pp. 15–17.
16. Mitrovica J.X. and Milne G.A. On the origin of late Holocene sea-level highstands within equatorial ocean basins. *Quaternary Science Reviews*, 2002, Vol. 21, pp. 2179–2190. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00080-X)
17. McCay N.P., Overpeck J.T., and Otto-Bliesner B.L. The role of ocean thermal expansion in Last Interglacial sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 2011, Vol. 38, L14605. doi:10.1029/2011GL048280
18. Farinotti D., Huss M., Fürst J.J., Landmann J., Machguth H., Maussion F., and Pandit A. A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 2019, Vol. 12, pp. 168–173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>
19. Radić V. and Hock R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Journal of Geophysical Research*, 2006, vol. 115, F01010. doi:10.1029/2009JF001373
20. Robinson A., Alvares-Solas J., Calov R., Ganapolski A., and Montoya M. MIS-11 duration key disappearance of the Greenland ice sheet. *Nature Communications*, 2017, Vol. 8, 16008. doi:10.1038/ncomms16008
21. Bamber J.L., Riva R.E.M., Vermeersen B.L.A., and LeBrocq A.M. Reassessment of the Potential Sea-Level Rise from a Collapse of the West Antarctic Ice Sheet. *Science*, 2009, Vol. 324, pp. 901–903.
22. DeConto R.M. and Pollard D. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 2016, Vol. 531, pp. 591–597. <https://doi.org/10.1038/nature17145>
23. Goelzer H., Huybrechts P., Loutre M.-F., and Fichefet T. Last Interglacial climate and sea-level evolution from a coupled ice sheet–climate model. *The Cryosphere*, 2016, Vol. 12, pp. 2195–2213. <https://doi.org/10.5194/cp-12-2195-2016>