

Палеогляциология

УДК 551.583.7

doi:10.15356/2076-6734-2017-1-117-132

Холодный эпизод около 8200 лет назад в Северной Европе: анализ эмпирических данных и возможных причин

© 2017 г. И.И. Борзенкова^{1*}, О.К. Борисова², Е.Л. Жильцова¹, Т.В. Сапелко³¹Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия;²Институт географии РАН, Москва, Россия; ³Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

*irena_borzen@mail.ru

Cold period in the Northern Europe in the past (about 8200 years ago): analysis of empirical data and possible causes

I.I. Borzenkova^{1*}, O.K. Borisova², E.L. Zhiltsova¹, T.V. Sapelko³¹State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia; ²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;³Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

*irena_borzen@mail.ru

Received October 1, 2016

Accepted December 25, 2016

Keywords: *cold period in the past, lessons from past for future, mechanisms of the rapid climate changes in past.*

Summary

Cold episode in Northern Europe happened about 8200 years ago was known for a relatively long time, mainly due to paleobotanical (palynological) data obtained from analysis of lake and peat sediments. Detailed analysis of ice cores from the Greenland holes GRIP, GISP2, and NGRIP with a time resolution of about 10 years made possible to refine the duration and characteristics of the time structure of this cold period. This cooling lasted for approximately 160 yr. Spore-pollen analysis of lake sediments in Northern Europe (Sweden, Finland, Denmark, Germany, the North and North-West of Russia) and deep-sea cores of the North Atlantic showed that the mean annual air temperature during the maximum stage of the cooling was reduced by 1–2 °C, and in some areas by more than 3 °C. The cold spread from the coast of the North Atlantic into the European continent and manifested itself mostly in Sweden, Finland, the Baltic States, and to a lesser extent in the North-West and West of the Russian Federation. In the central Russia and North of 70°N the cooling was weak or absent. The question about a nature of this cold event and other cold spells in Late Glaciation, known as the cold of the early, middle and late Dryas, is widely discussed in the scientific literature. Most of scientists accept a hypothesis proposed more than 20 years ago, that the reduction of air temperatures in regions immediately adjacent to the North Atlantic was caused by the large volume of melt water discharged into the ocean as a result of disintegration and melting of ice-sheets. Climate models that take into account these effects allow estimating a decrease in the air and sea surface temperature due to freshening (desalination) of the upper ocean layer, and this confirms that the greatest decrease in temperature should be observed in the regions directly adjacent to the ocean. The increase in global temperature over the last 30 years is estimated to be 0.8 ± 0.2 °C, which is already reflected in a noticeable increase in precipitation in high latitudes. In addition, the melting of mountain glaciers and sea ice in the Arctic basin promotes freshening of the upper ocean, and as a result of these processes one can expect a certain decrease in the air temperature in the high latitudes if the present-day climate warming will continue. On the basis of paleoclimatic data, it can be assumed that such a decrease in air temperature can be relatively small and occur only in areas directly adjacent to the North Atlantic.

Поступила 1 октября 2016 г.

Принята к печати 25 декабря 2016 г.

Ключевые слова: *возможные сценарии климата в будущем, механизм быстрых колебаний климата в прошлом, похолодание 8200 лет назад.*

Уже более 20 лет в Северной Европе известен холодный эпизод около 8200 лет назад. Похолодание продолжалось около 160 лет, температуры воздуха снижались на 1–2 °C, а в отдельных районах – более чем на 3 °C. Предполагается, что снижение температур воздуха было связано с поступлением больших объёмов пресной воды в Северную Атлантику в результате распада и таяния ледников. Подобный механизм имеет прямое отношение к оценкам будущего климата при развитии современного глобального потепления. Поскольку таяние горных ледников и морских льдов в Полярном бассейне способствует опреснению верхнего слоя океана, при развитии потепления в районах, непосредственно прилегающих к Северной Атлантике, можно ожидать некоторого снижения температуры воздуха в высоких широтах.

Введение

Палеоклиматические записи с высокой степенью временного разрешения (от первых лет до первых десятков лет), полученные на основе анализа ледяных и морских кернов, озёрных осадков и пещерных отложений (сталагмитов), позволили восстановить детальную картину климатических событий позднеледниковья и раннего голоцена. Период между 14 и 8 тыс. лет назад (л.н.) отличался нестабильностью климата, когда на фоне положительного тренда глобальной температуры, обусловленного ростом летней солнечной радиации под воздействием астрономических факторов, отмечались значительные кратковременные похолодания, каждое из которых заканчивалось быстрым потеплением. Относительно точно эти эпизоды датированы в ледяных кернах, взятых из разных районов Гренландского ледникового щита [1–3]. Это позволило восстановить временную картину климатических событий раннего голоцена, используя детальную хронологию гренландских кернов GRIP, GISP2 и NGRIP, основанную на подсчёте годовых слоёв льда. Холодные эпизоды около 8200 и 9300 л.н. детально исследованы в работах [2–4]; в этих же работах выделены ещё несколько холодных эпизодов, датируемых около 11 тыс. 400 (11 тыс. 300) и 10 тыс. 200 (10 тыс. 300) л.н.¹ Похолодание около 11 тыс. 400 л.н. можно сопоставить с известной уже ранее по данным анализа озёрных и континентальных отложений холодной пребореальной осцилляцией [5]. Продолжительность этого похолодания оценивается в 150–200 лет, что сопоставимо с продолжительностью последующих холодных эпизодов — около 9300 (9200) и 8200 л.н. Конец пребореального похолодания датируется временем около 11 тыс. 320 л.н., когда температура воздуха в высоких широтах, согласно кислородно-изотопным данным по гренландским ледяным кернам, увеличилась на $4 \pm 1,5$ °C в течение нескольких десятилетий [6].

По мнению многих исследователей, механизм этих кратковременных похолоданий обуслов-

лен нарушениями термохалинной циркуляции в Северной Атлантике в результате поступления больших объёмов пресной воды в процессе таяния континентальных ледяных щитов Северной Америки и Европы [7–11]. Опреснение верхнего слоя океана и связанные с этим процессом нарушения термохалинной циркуляции проявились не только в снижении температуры воздуха в высоких и умеренных широтах Северной Европы, но также и в изменении климата в других регионах, в частности в изменении интенсивности муссонной циркуляции в тропических и субтропических широтах. Во время похолоданий позднеледниковья и раннего голоцена отмечаются значительное снижение интенсивности муссонной циркуляции и сдвиг её северной границы к югу. Эти процессы вызывали снижение количества осадков в субтропических районах Африки, Индии и юго-востока Азии [4, 12]. Современное повышение глобальной температуры, в результате которого может увеличиться поступление пресной воды в Северную Атлантику из-за таяния морских льдов в Арктическом бассейне, сокращения Гренландского ледникового щита и таяния горных ледников в Северной Европе и Канаде, заставляет обратиться к изучению подобных ситуаций в прошлом, когда имели место более значительные по сравнению с современным изменением климата [4, 7, 8, 13].

Настоящее исследование посвящено изучению временной и пространственной структуры последнего холодного эпизода раннего голоцена в Северной Европе, датируемого временем около 8200 л.н. и известного в литературе как «событие 8.2 ka». Этот холодный эпизод наиболее полно обеспечен независимыми эмпирическими данными и представляет собой ключевое событие для описания особенностей циркуляционного режима в океане и атмосфере, который установился в Северной Европе в процессе распада последнего ледникового покрова. Временные и пространственные закономерности этого похолодания в Северной Европе можно рассматривать в качестве возможного сценария для оценки изменений климата в будущем под влия-

¹ Здесь и далее речь идёт о калиброванных датах, близких по времени к датам ледниковой шкалы, разработанной в [2]. Отметим, что для гренландской ледовой хронологии отсчёт ведётся от 2000 г. («шкала b2k»), тогда как для шкалы калиброванного радиоуглеродного возраста, к которой обычно привязаны архивы «континентальных» палеоданных, за ноль принимается 1950 г.

нием опреснения верхнего слоя океана в результате таяния Гренландского ледникового щита, морских льдов в Северном Ледовитом океане и горных ледников Европы и Канады.

Эмпирическая информация и методы исследований

Анализу эмпирических материалов, позволяющих реконструировать климатические события раннего голоцена и событие около 8200 л.н., посвящено большое число исследований [7–9, 14–21]. Наиболее детально похолодание около 8200 л.н. изучено на основе анализа спорово-пыльцевых и кислородно-изотопных данных озёрных отложений из районов, непосредственно прилегающих к Северной Атлантике, где оно проявилось наиболее отчётливо [8, 15–19]. Независимые количественные данные об изменении температуры во время этого похолодания получены на основе кислородно-изотопных данных по гренландским кернам [1–3, 6], морским колонкам из Северной Атлантики [22] и из кальцитовых отложений пещер (сталагмитов) Центральной Европы и других регионов [23, 24].

Выявление кратковременных климатических событий (продолжительностью в несколько сотен лет) в прошлом и реконструкции климата для них особенно трудны в методологическом отношении. Для выделения сравнительно небольших по амплитуде и непродолжительных по времени колебаний климата по геологическим «записям» требуются пробы, отобранные с высокой степенью дискретности и обеспеченные надёжным временным контролем. Предполагается, что временная дискретность отбора проб должна составлять не менее 50 лет. Появление в последнее время геологических записей с высокой степенью временного разрешения позволяет обратиться к анализу временной структуры относительно непродолжительных колебаний климата в прошлом и построению пространственных реконструкций климатических параметров, прежде всего температуры приземного слоя воздуха, для таких климатических событий.

Наиболее полно таким требованиям, необходимым для анализа временной и пространственной изменчивости климата во время непродолжительных колебаний климата в прошлом (как

похолоданий, так и потеплений), отвечают кислородно-изотопные данные, полученные в результате анализа ледяных кернов, кальцитовых отложений (сталагмитов и сталактитов) из континентальных пещер или озёрных отложений. Однако эти материалы довольно редки и не позволяют получить достоверной пространственной и временной картины климатических изменений. Значительная часть эмпирических данных представлена спорово-пыльцевыми диаграммами, полученными с достаточно высоким временным разрешением и датированными радиоуглеродным методом. В последнее время для количественных оценок температуры воздуха по данным изучения озёрных осадков, наряду с пыльцевым анализом, используются методы анализа состава личинок комаров-звонцев, или хирономид (*Chironomidae*), и ветвистоусых рачков (*Cladocera*) [25, 26].

Морские колонки с высокой скоростью седиментации также служат источником независимых косвенных данных, которые позволяют выделить относительно кратковременные климатические события. Чаще всего для этой цели используют колонки с высокой временной дискретностью, датированные изотопными методами. Такие данные позволяют получить количественные оценки изменений температуры поверхности и глубоких слоёв воды на основе изучения состава планктона или бентоса и оценить интенсивность ледового разноса при помощи седиментологического или минералогического анализа морских осадков. В качестве альтернативного метода оценки температуры поверхности воды в последнее время довольно часто используют соотношение Ca/Mg в морских осадках [27–30].

Временная и пространственная структура похолодания «8.2 ka» в Северной Европе

На рис. 1 приведена карта ключевых разрезов, данные по которым использованы для реконструкции похолодания около 8,2 тыс. л.н. в Северной Европе. Описание разрезов содержится в табл. 1, которая в качестве Приложения к материалам статьи доступна на сайте http://www.fluvial-systems.net/Borzenkova_et_al_supplement.html [31]. Архив состоит более чем из 70 разре-

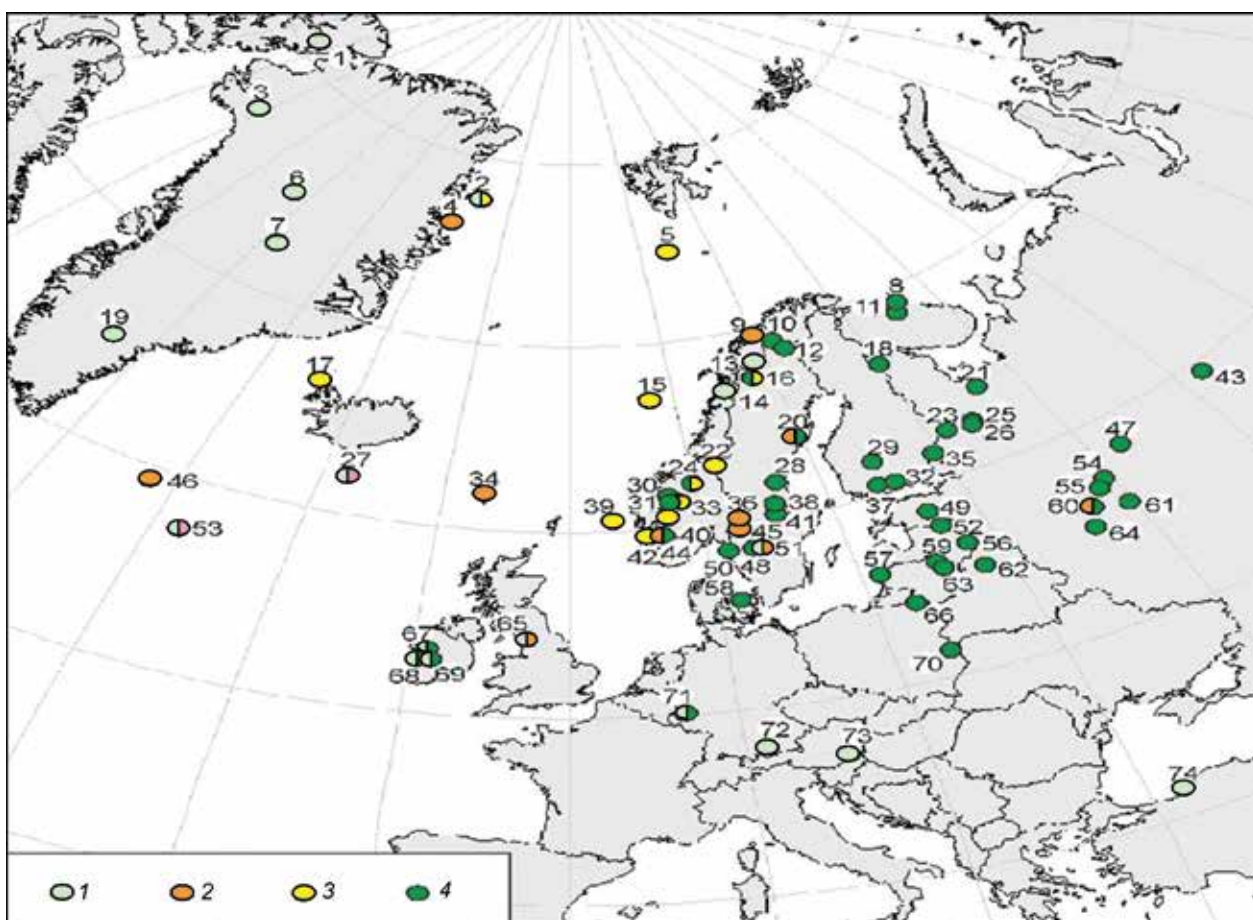


Рис. 1. Ключевые разрезы, использованные для реконструкции климата холодного эпизода 8200 лет назад. Номера точек на рисунке соответствуют номерам разрезов в табл. 1, представленной на сайте: http://www.fluvial-systems.net/Borzenkova_et_al_supplement.html

Использованные данные: 1 – изотопные; 2 – седиментологические; 3 – палеофаунистические; 4 – палинологические

Fig. 1. Key sections used for the climate reconstructions of the cold episode about 8200 years ago.

The numbers of the sites correspond to the numbers of in Table 1 in http://www.fluvial-systems.net/Borzenkova_et_al_supplement.html
The data used for the reconstruction: 1 – isotopic; 2 – sedimentological; 3 – faunistic; 4 – palynological

зов, датированных изотопными методами, и представлен данными пылевого, кислородно-изотопного, фаунистического и седиментологического анализов применительно к морским, озёрным и иным отложениям. В Приложении [31] доступен также полный список литературы, использованной при составлении этого архива. Наиболее точно холодный эпизод около 8200 л.н. установлен по данным изотопных исследований гренландских ледяных кернов [1–3, 32]. Анализ этих данных показал, что похолодание началось около $8300 \pm 10 / -40$ л.н. и закончилось около $8140 \pm 50 / -10$ л.н. с максимальной ошибкой в 45 лет. Внутри этого холодного эпизода обнаружен прослой вулканического пепла с датировкой 8236 ± 1 л.н. В работе [1] использованы

данные, полученные в рамках бурения Гренландского щита по проекту GISP2 с временным разрешением около 10 лет в интервале, соответствующем возрасту газа, захороненного во льду между 7600 и 8600 л.н. Эти данные показывают сложную временную структуру похолодания. Наиболее холодная фаза отмечалась в его середине, тогда как в начале и в конце климат был более мягким. Согласно изотопным данным по керну GISP2, два относительно тёплых эпизода датируются временем около 8220 и около 8160 л.н. Продолжительность всего холодного события составляет около $160,5 \pm 5,5$ лет, а наиболее холодной его части – приблизительно 69 ± 2 года [3].

На рис. 2 показаны изменения температуры, реконструированные по данным об изме-

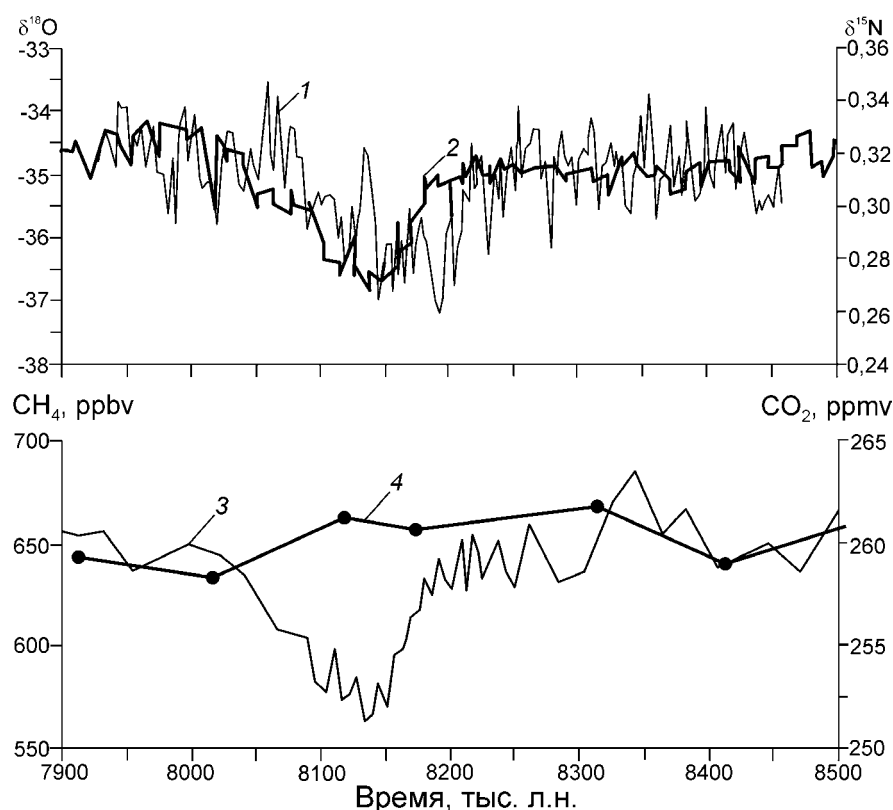


Рис. 2. Временная структура похолодания 8200 лет назад и изменения концентрации парниковых газов в атмосфере между 8500 и 7900 лет назад.

Верхняя панель. Изменение температуры воздуха по данным кислородно-изотопного анализа $\delta^{18}\text{O}$ по керну GRIP [3] (кривая 2) и по соотношению изотопов азота $\delta^{15}\text{N}$ по керну GISP2 (кривая 1) [1].

Нижняя панель. Изменение концентрации метана в атмосфере (кривая 3) по данным керна GISP2 [1] и концентрации CO_2 (кривая 4) по керну Dome C (проект EPICA) [33]

Fig. 2. Time structure of the cold episode about 8200 years ago and concentration changes of the green house gases between 8500 and 7900 years ago.

Upper Panel. Air temperature changes according to oxygen-isotope record $\delta^{18}\text{O}$ from GRIP (curve 2) [3] and to nitrogen-isotope record $\delta^{15}\text{N}$ from GISP2 (curve 1) [1].

Lower Panel. Methane concentration in the atmosphere (curve 3) according to GISP2 record [1] and CO_2 concentration (curve 4) according to Dome C record (EPICA Project) [33]

нениях изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) в керне GRIP и азота ($\delta^{15}\text{N}$) в керне GISP2 [1, 3, 32]. Анализ рис. 2 показывает, что независимые изотопные данные, полученные по двум ледяным кернам в рамках проектов GRIP и GISP2, достаточно хорошо согласуются и подтверждают сложную временную структуру этого холодного эпизода. На нижней панели графика показаны изменения содержания метана в атмосфере по данным анализа пузырьков воздуха во льду керна GISP2 и колебания содержания CO_2 по данным анализа ледяного керна, полученного в рамках проекта EPICA (Антарктида) [33]. Концентрация метана в атмосфере — одного из наиболее активных парнико-

вых газов — практически сразу отреагировала на изменение температуры воздуха. Снижение концентрации метана с 635 ppbv в начале похолодания до $555 \pm 18 \text{ ppbv}$ во время его максимальной фазы означает сокращение эмиссии метана в атмосферу на 32 ± 14 мегатонн (Tg): с 220 до 188 ± 10 Tg метана в год (1 мегатонна = 10^9 кг). В то же время концентрация углекислого газа, по данным изучения ледяных кернов из Антарктиды с высокой степенью временного разрешения (от 8 до 16 лет) в интервале 7400–9000 л.н. практически не изменялась. Как видно из рис. 2, содержание метана в атмосфере тесно связано с изменением температуры воздуха: временной сдвиг между этими элементами составляет пер-

вые десятки лет, причём содержание метана в атмосфере следует за изменениями температуры. Стабильность содержания углекислого газа на протяжении похолодания подтверждается данными, представленными в работе [34].

Сложная временная структура холодного эпизода 8200 л.н. подтверждается независимой информацией, полученной при помощи изотопного анализа (^{18}O и ^{13}C) пещерных отложений (сталагмитов и сталактитов) из разных регионов Европы (северо-запад Англии, юго-запад Ирландии, центральная часть Австрии, западная часть Германии). В изотопных данных, полученных по сталагмитам из пещеры Катерлох (Австрия), хорошо выделяются холодные эпизоды, предшествовавшие похолоданию 8200 л.н. и имевшие место около 9100 и 10 тыс. л.н. [23]. Все изотопные записи имеют временное разрешение первые десятки лет, иногда и годы [23, 24, 35, 36]. Продолжительность холодного эпизода в разных районах Европы составляла от 150 до 200 (300) лет. Снижение температуры воздуха в Центральной Европе во время похолодания около 9100 л.н. оценивается в $2,9^\circ\text{C}$, а во время события «8.2 ка» — в 3°C [23].

Наиболее резкое похолодание во временном интервале события «8.2 ка» отмечается в центральных районах Гренландии, где по данным кислородно-изотопного анализа керна GISP2 в начале события температура понизилась на $3\pm 1^\circ\text{C}$ в течение 20 лет [1]. В максимум этого похолодания, по данным о содержании изотопов азота $\delta^{15}\text{N}$ в ледяном керне из скважины GRIP, понижение температуры воздуха в центральной части Гренландии оценивается в более широких пределах: от $-5,4$ до $-11,4^\circ\text{C}$ (в среднем $-7,4^\circ\text{C}$) [32].

Исследования морских колонок из Северной Атлантики с временным разрешением от первых десятков лет дополняют картину климатических изменений во время похолодания 8200 л.н. независимой информацией о колебаниях температуры поверхности воды. Анализ видового состава планктонных фораминифер в колонках из высоких широт Северной Атлантики показал, что снижение температуры поверхности воды во время этого события составляло от $1,5$ до 3°C [28, 29, 37]. По данным изучения морских осадков по колонкам MD 95-2011 в Норвежском море и LO09-14 в районе хр. Рей-

кьявик, отчётливо выраженное похолодание реконструировано по изменениям кислородно-изотопного состава осадков и состава радиолярий в них [27, 30]. На основе изменений в составе радиолярий из донных отложений Норвежского моря рассчитано изменение температуры поверхности воды за последние 10 тыс. лет. Анализ полученных данных показал, что продолжительность похолодания 8200 л.н. в районе Норвежского моря составляла 180–200 лет, а температура поверхности воды понижалась не менее чем на 2°C [27, 30]. Близкие оценки получены и по кислородно-изотопному анализу морских осадков из других регионов Северной Атлантики [22].

Спорово-пыльцевые диаграммы по озёрным и болотным отложениям содержат обширную информацию об изменении температуры воздуха в разных регионах Европы в раннем голоцене и, в частности, о проявлении похолодания 8200 л.н. [38, 39]. На основе анализа около 500 пыльцевых диаграмм из разных регионов, охватывающих последние 12 тыс. лет, в работе [38] холодный эпизод «8.2 ка» выделен практически на всей территории Западной Европы, причём самое значительное снижение температуры воздуха отмечено в районах, непосредственно прилегающих к Северной Атлантике. Более детальный анализ пыльцевых диаграмм из разных районов Балтийского бассейна представлен в работах [17–19, 40–46]. Летние температуры воздуха в этом регионе понижались на $1\text{--}2^\circ\text{C}$ и более, причём по мере продвижения на север и на восток проявление похолодания ослабевает [7]. Так, по пыльцевым данным из Эстонии и южной части Финляндии и Швеции, температуры воздуха снижались не менее чем на 1°C , в то время как к северу от 70° с.ш. похолодание было выражено относительно слабо или вовсе отсутствовало. В районе оз. Руж (южная часть Эстонии) во время события «8.2 ка» летние температуры воздуха, согласно пыльцевым данным по озёрным отложениям, снижались на $1,8^\circ\text{C}$ [19], что согласуется с оценками похолодания в Центральной Европе, полученными в результате модельных расчётов [21].

Наиболее отчётливо похолодание 8200 л.н. проявилось в снижении доли пыльцы теплолюбивых широколиственных пород — вяза (*Ulmus*) и лещины (*Corylus*) — с 10–15% во время по-

тепления в раннем голоцене до 5% в интервале 8250–8050 календарных л.н. Это установлено по данным палинологических исследований озёрных отложений на территории Финляндии, Швеции и Эстонии южнее 61° с.ш. [7, 17, 19, 40–47]. На территории юго-восточной Латвии относительно тёплый и стабильный климат начала голоцена сменился похолоданием около 8350–8150 календарных л.н., во время которого средние годовые температуры воздуха понижались на 0,9–1,8 °C, что проявилось в изменении видового состава растительности, в снижении содержания пыльцы широколиственных древесных пород и в увеличении доли пыльцы бореальных видов (берёзы и ели) [42]. В восточной части Балтийского бассейна (в Литве и Латвии) во время похолодания отмечается увеличение доли пыльцы ели, что свидетельствует о снижении температуры воздуха и увеличении годовых сумм осадков [42, 45, 47].

Изменения магнитной восприимчивости и содержания органического углерода в осадках указывают на активизацию эрозионных процессов в интервале с 8066 ± 25 до 7920 ± 25 лет назад, которую авторы объясняют увеличением количества твёрдых осадков зимой и повышением интенсивности стока в период снеготаяния [48]. По оценкам, полученным для территории Эстонии на основании палинологических данных [44], событие «8.2 ka» имело несколько большую продолжительность по сравнению с оценками по изменениям изотопного состава гренландских ледяных кернов и спелеотем из Центральной Европы. Возможно, такое видимое увеличение продолжительности холодной фазы в действительности отражает довольно длительный процесс восстановления состава растительности при потеплении после этапа снижения годовых температур воздуха не менее чем на 1,5–2,0 °C. На территории Германии продолжительность похолодания, реконструированная по изменениям изотопного состава карбонатов, содержащихся в раковинках остракод из осадков оз. Аммерзее, оценивается в 200 лет при снижении летних температур воздуха на 1,7 °C [36]. На территории Польши похолодание около 8200 л.н. хорошо выделяется по пыльцевым и микрофаунистическим данным ветвистоусых рачков (*Cladocera*) по озёрным отложениям в разных районах [25, 26].

Практически все данные показывают, что снижение температуры воздуха в зимнее время было значительно больше по сравнению с тёплым сезоном, что способствовало более раннему образованию и более позднему таянию морского и озёрного льда. Однако отсутствие надёжных индикаторов оценки температуры воздуха в зимнее время среди разнообразных палеогеографических данных не позволяет количественно оценить эти изменения. Во время похолодания, согласно некоторым данным, отмечается также увеличение скорости аккумуляции снега [48].

На северо-западе и в центральных районах Европейской территории России (ЕТР) похолодание «8.2 ka» выделяется не во всех разрезах и чаще всего проявляется в сравнительно небольших изменениях в составе пыльцевых спектров — (см. табл. 2 на сайте http://www.fluvial-systems.net/Borzenkova_et_al_supplement.html) [31]. Анализ изменений в составе растительности позволяет предположить только небольшое снижение температуры (0,5 °C и менее) в средней полосе ЕТР. В то же время некоторые данные пыльцевого анализа озёрных и болотных отложений, имеющие высокую степень временного разрешения и надёжный временной контроль, дают возможность достаточно уверенно выделить кратковременное и малоамплитудное похолодание около 8200 л.н., а также другие холодные эпизоды раннего голоцена [49].

На рис. 3 дана карта разрезов, где цветными кружками обозначена степень проявления похолодания, реконструированная на основе спорово-пыльцевого анализа озёрных и болотных отложений на ЕТР и соседних территориях. Как видно из этого рисунка, на большей части ЕТР похолодание было выражено слабо или не проявилось совсем, причём явно прослеживается тенденция к ослабеванию проявлений похолодания по мере продвижения на восток.

Наряду с палинологическими данными, для независимых оценок с успехом используется анализ ископаемых остатков хирономид [46]. Исследования показали, что изменения в составе и соотношениях разных видов этого семейства двукрылых отзываются даже на сравнительно небольшие изменения в термическом режиме, прежде всего на колебания летней температуры воздуха. Анализ состава хирономид

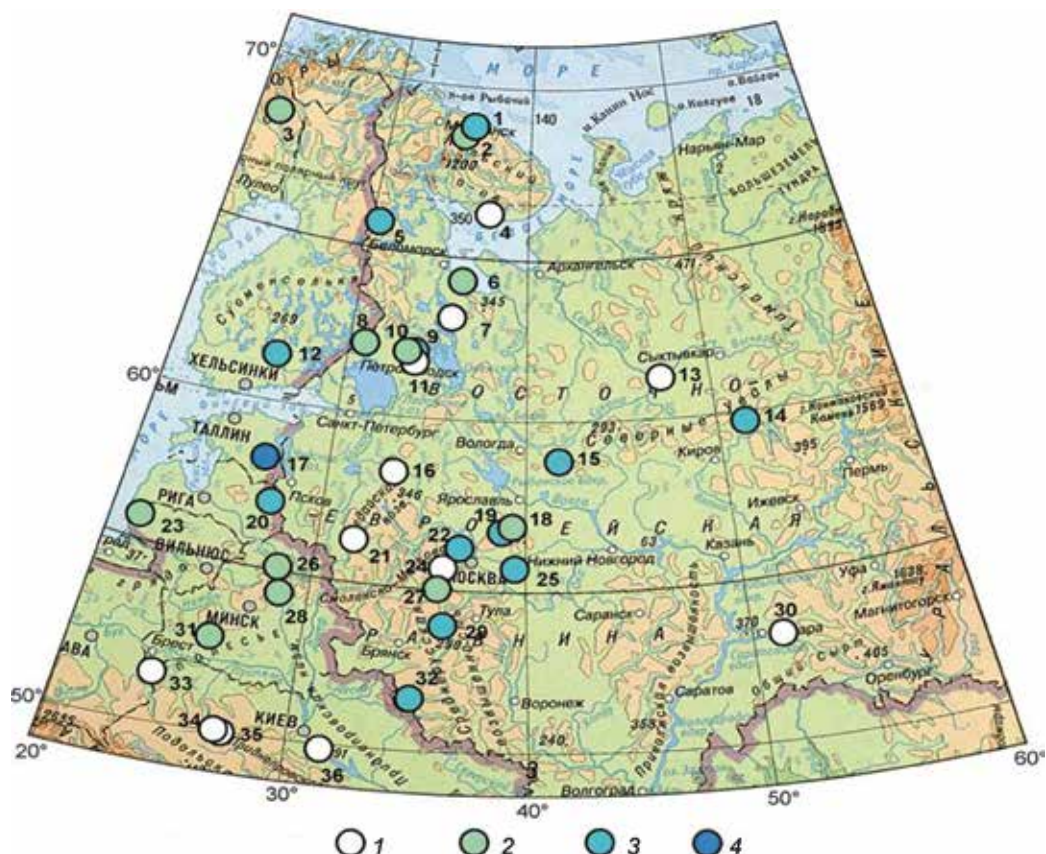


Рис. 3. Степень проявления похолодания 8200 лет назад. Реконструкция по палинологическим данным. Номера точек на карте соответствуют номерам разрезов в табл. 2, представленной в приложении http://www.fluvial-systems.net/Borzenkova_et_al_supplement.html

1 – следы похолодания отсутствуют; 2 – следы похолодания очень слабые или сомнительные; 3 – похолодание выражено слабо; 4 – похолодание хорошо выражено

Fig. 3. The degree of manifestation of the cooling 8200 years ago. Reconstruction based on palynological data.

The numbers of the sites correspond to the numbers of in Table 2 in http://www.fluvial-systems.net/Borzenkova_et_al_supplement.html
1 – cooling is not detected; 2 – little or no cooling; 3 – slight cooling; 4 – significant cooling

в озёрных отложениях Северной Норвегии и Центральной Швеции позволил количественно оценить изменения температуры воздуха в этих районах в голоцене. Похолодание «8.2 ка» чётко выделяется по всем озёрным разрезам; снижение летней температуры оценивается в 1–2 °C [46]. Обобщение количественных оценок, полученных на основе различных эмпирических данных, приведённых в табл. 1 на сайте http://www.fluvial-systems.net/Borzenkova_et_al_supplement.html [31], позволило выполнить пространственную реконструкцию изменения летней температуры воздуха на большей части Северной Европы, включая и Северную Атлантику.

На рис. 4 представлено пространственное распределение снижения летней температуры воздуха и поверхности воды во время холодного

эпизода 8200 л.н. по сравнению с более тёплыми интервалами до и после этого похолодания. Как видно на этом рисунке, максимальное похолодание происходило в Гренландии и на северо-востоке Канады, где понижение температуры, вероятно, составляло 5–6 °C и более. Значительное похолодание, когда температуры поверхности воды снижались на 3–4 °C, было характерно для Северной Атлантики в районе Гренландии и Исландии. На остальной части Северной Атлантики понижение температуры не превышало 1,5–1,0 °C. В Северной Европе наибольшее снижение температур происходило на территории, непосредственно прилегающей к побережью Атлантического океана, и в бассейне Балтийского моря. В этих районах снижение летних температур воздуха составляло более 1,5 °C.



Рис. 4. Понижение температуры воздуха (°C) по сравнению с более тёплым предшествующим периодом во время холодного эпизода 8200 лет назад.

Точками на карте обозначены ключевые разрезы

Fig. 4. Air temperature decrease (°C) during the cold episode about 8200 years ago compared to the previous warmer time. Points show positions of the key sections

Приведённую реконструкцию мы рассматриваем как предварительную. По мере получения новых материалов она будет уточняться, однако уже сейчас можно проследить определённую тенденцию к уменьшению похолодания по мере удаления от Северной Атлантики в глубь материка и по мере продвижения на север (севернее 65–70° с.ш.). Отметим, что в горных областях Центральной Европы имело место более значительное понижение температуры воздуха (до 3,0 °C), о чём свидетельствуют данные, полученные по изотопному анализу спелеотем из горных пещер. Независимые данные по горным территориям подтверждают снижение верхней границы леса не менее чем на 100–150 м и активизацию горного оледенения во время похолодания 8200 л.н. [39, 50, 51].

О возможных механизмах похолодания около 8200 лет назад в Северной Европе

Вопрос о причинах похолодания во время события «8.2 ка» и других холодных эпизодов позднеледниковья и раннего голоцена давно привлекает внимание исследователей [7, 9–11,

52–54]. Климат позднеледниковья и раннего голоцена между 14 тыс. и 8 тыс. л.н. отличался крайней нестабильностью, когда на фоне общего положительного тренда глобальной температуры, обусловленного увеличением поступающей солнечной радиации за счёт изменения элементов земной орбиты, отмечались относительно кратковременные похолодания, которые чередовались с быстрыми потеплениями. Наиболее достоверно эти эпизоды датированы в изотопных кривых, полученных в результате анализа ледяных кернов из Гренландии, морских осадков из Северной Атлантики и пещерных отложений из континентальных районов Центральной Европы. Некоторые исследователи выделяют более десяти эпизодов потеплений и похолоданий с разной продолжительностью и амплитудами между 14 тыс. и 8 тыс. л.н. [4]. Если потепление позднеледниковья – раннего голоцена можно объяснить увеличением поступающей солнечной радиации, то механизм кратковременных следующих одно за другим похолоданий долгое время оставался неясным [55].

Некоторые исследователи пытались объяснить похолодание «8.2 ка» снижением прихода солнечной радиации за счёт изменения

активности Солнца [56], однако, по мнению большинства специалистов, это похолодание и другие холодные эпизоды последних 14 тыс. лет связаны с изменениями циркуляции поверхностных и глубинных вод Северной Атлантики, вызванными поступлением больших объёмов пресной воды в процессе распада континентальных ледниковых щитов. У. Брокер был одним из первых, кто обосновал эту гипотезу, которая в последнее время подтверждается как эмпирическими данными, так и модельными расчётами [10]. Эмпирические данные, полученные в результате анализа глубоководных колонок из Северной Атлантики с высокой степенью временного разрешения и датированные изотопными методами, позволили воссоздать детальную картину распада Лаврентийского ледникового щита и определить время поступления больших объёмов пресной воды в Северную Атлантику в результате спуска приледниковых и ледниковых озёр [52, 53, 57, 58]. П. Кларк с соавторами, развивая гипотезу Брокера, предположили, что опреснение верхнего слоя океана не только нарушает циркуляцию в верхнем его слое, но и препятствует процессу формирования глубинных вод, тем самым влияя на интенсивность и положение самого «атлантического конвейера» [11].

Спуск ледниковых мегаозёр Агассис и Оджибвэй, образовавшихся в результате распада Лаврентийского ледникового щита, датируется временем около $8470 \pm 0,3$ календарных л.н. Во время этого катастрофического события в Северную Атлантику менее чем за 100 лет поступил огромный объём пресной воды (~ 163 тыс. м^3) [53, 57]. Очевидно, что подобное событие должно было серьёзно повлиять не только на процессы в верхнем слое океана, но и на формирование промежуточных и глубинных вод в Северной Атлантике. В результате опреснения верхнего слоя океана замедляется процесс формирования глубинных океанических вод, что, в конечном счёте, приводит к снижению скорости «атлантического конвейера», а возможно, и к его кратковременной остановке. Из эмпирических данных известно, что холодные эпизоды позднеледниковья и раннего голоцена имели разную продолжительность и разную глубину похолодания, что, возможно, определялось количеством пресной воды, по-

ступающей в океан. Данные по морским колонкам из высоких широт Северной Атлантики показали, что в течение позднеледниковья и раннего голоцена зафиксированы по крайней мере пять крупных сбросов пресной воды, которые отмечены резкими изменениями уровня океана не только в Атлантике, но и в других частях Мирового океана [58].

В результате таяния Лаврентийского ледникового щита в Северную Атлантику в течение многих сотен лет поступала пресная вода, приток которой оценивается в пределах $0,3 \pm 0,03$ Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$). Этот постоянный приток пресной воды также мог приводить к изменениям термохалинной циркуляции в Северной Атлантике: когда изменения солёности достигали некоторого порогового значения, происходило замедление или даже кратковременный коллапс термохалинной циркуляции. Последствие этих процессов — снижение температуры поверхности воды и воздуха на несколько столетий, которое наиболее отчётливо проявлялось в прилегающих к Северной Атлантике регионах. Результаты моделирования подтверждают, что приток пресной воды в океан может привести к климатическим изменениям в том случае, если его интенсивность будет не менее чем $0,1$ Sv в год в течение нескольких столетий [54].

Заключение

Как показал анализ косвенной палеоклиматической информации, холодные эпизоды раннего голоцена происходили на фоне более высокой по сравнению с современной приходящей солнечной радиации в летнее время за счёт астрономических факторов [55]. Постоянный приток пресной воды в Северную Атлантику в результате таяния материковых ледниковых щитов, в первую очередь Лаврентийского щита, по данным изучения морских колонок составлял в разное время от $0,29$ до $0,19$ Sv. В результате распада озёрной мегасистемы Агассис—Оджибвэй в Северную Атлантику на протяжении длительного времени поступали большие объёмы пресной воды; кроме того, дополнительное количество пресной воды поступало в океан в виде относительно кратковременных катастрофических сбросов. В результате опресне-

ния верхнего слоя океана нарушался процесс формирования глубинных океанических вод, происходило ослабление Гольфстрима и замедление термохалинного «атлантического конвейера». Следствие таких изменений — снижение температуры поверхности воды в Северной Атлантике и температуры воздуха в Северной Европе во время нескольких холодных эпизодов раннего голоцена, каждый из которых длился около 200 лет.

Выполненная в данной работе пространственная реконструкция для похолодания около 8200 л.н., позволяющая оценить степень похолодания в северной части Европы (включая и территорию Европейской части России), показала, что наиболее значительное снижение летних температур воздуха отмечалось на севере Атлантики и в материковых районах, непосредственно к ней примыкающих. По мере продвижения в глубь европейского континента степень похолодания уменьшалась, и в восточных районах ЕТР холодный эпизод уже практически не фиксируется в спорово-пыльцевых диаграммах.

В низких и субтропических широтах во время этого похолодания отмечались изменения в муссонной циркуляции и снижение муссонных осадков [12]. В последнее время вопрос о возможных изменениях современного климата при опреснении поверхностных вод Северной Атлантики в результате таяния морских льдов приобрёл особое значение [13]. По данным последнего отчёта МГЭИК, глобальная температура за последние 30–35 лет повысилась на $0,8 \pm 0,2$ °C по сравнению с концом XIX в.; при этом повышение температуры в высоких широтах составило не менее 2,0–2,5 °C [59]. Такое повышение глобальной температуры сравнимо с потеплениями, имевшими место в начале голоцена. На современное повышение глобальной температуры быстрее всего отреагировала криосфера Земли — значительным сокращением площади постоянных морских льдов в Северном Ледовитом океане, таянием горных ледников и сокращением прибрежного оледенения Гренландии [13]. С этими процессами связано поступление дополнительных объёмов пресной воды в Северную Атлантику, которое усиливается возрастающим поступлением пресных речных вод в Северный Ледовитый океан в результате активизации ги-

дрологического цикла, наиболее отчётливо выраженной в высоких широтах [60].

К каким последствиям может привести современное таяние морских льдов, Гренландского щита, поступление пресных речных вод в Северный Ледовитый океан и другие процессы? Как показали палеоклиматические исследования, фактор времени играет решающую роль в формировании отклика климатической системы на изменение внешних факторов. Для глобального отклика климатической системы необходим длительный период (несколько сотен лет) поступления довольно значительных объёмов пресной воды (не менее 0,1 Sv) в океан. Современный приток пресной воды, поступающей в Северную Атлантику и Северный Ледовитый океан, как минимум на порядок меньше. В этом случае можно говорить о возможных региональных изменениях в температурном режиме районов, непосредственно прилегающих к Северной Атлантике и району Балтийского моря, но никак не о глобальных изменениях. Этот вывод соответствует данным, представленным в одной из последних публикаций С. Рамсторфа и его коллег [61]. По мнению авторов статьи, необходимо обратить особое внимание на возможные региональные изменения климата в сравнительно близком времени, что связано с опреснением поверхностных вод в районе Гренландии в результате сокращения объёмов прибрежных ледников и таяния морского льда в Северном Ледовитом океане. Уже в настоящее время отмечается некоторая тенденция к снижению температуры поверхности воды у восточного побережья Гренландии [61].

Благодарности. Анализ палинологических данных частично выполнен О. Борисовой в рамках плана фундаментальных исследований Института географии РАН по проблеме П-69 «Динамика и механизмы изменения ландшафтов, климата и биосферы в кайнозой. История четвертичного периода».

Acknowledgments. An analysis of palynological data was carried out by O. Borisova according to the Basic Research Plan of the Institute of Geography RAS, within the framework of the Problem П-69 «The dynamics and mechanisms of landscape, climate and biosphere changes in the Cenozoic. The history of the Quaternary».

Литература

1. Kobashi T., Severinghaus J.P., Brook E.J., Barnola J.-M., Grachev A.M. Precise timing and characterization of abrupt climate change 8200 years ago from air trapped in polar ice // *Quaternary Science Reviews*. 2007. V. 26. P. 1212–1222.
2. Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P., Blunier T., Buchardt S.L., Clausen H.B., Cvijanovic I., Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Fischer H., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Anders M., Svensson A.M., Vallelonga P., Vinther B.M., Walker M.J.C., Wheatley J.J., Winstrup M. 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. V. 106. P. 14–28.
3. Thomas E.R., Wolff E.W., Mulvaney R., Steffensen J.P., Johnsen S.J., Arrowsmith C., White J.W.C., Vaughn B., Popp T. The 8.2 ka event from Greenland ice cores // *Quaternary Science Reviews*. 2007. V. 26. P. 70–81.
4. Fleitmann D., Mudelsee M., Burns S.J., Bradley R.S., Kramers J., Matter A. Evidence for widespread climatic anomaly at around 9.2 ka before present // *Paleoceanography*. 2008. V. 23. PA1102. doi:10.1029/2007PA001519.
5. Hoek W.Z., Bos J.A.A. Early Holocene climate oscillations – causes and consequences // *Quaternary Science Reviews*. 2007. V. 26. P. 1901–1906.
6. Grachev A.M., Severinghaus J.P. A revised $+10 \pm 4^\circ\text{C}$ magnitude of the abrupt change in Greenland temperature at the Younger Dryas termination using published GISP2 gas isotope data and air thermal diffusion constants // *Quaternary Science Reviews*. 2005. V. 4. P. 513–519.
7. Borzenkova I.I., Zorita E., Borisova O.K., Kalniņa L., Kisieliene D., Koff T., Kuznetsov D., Lemdahl G., Sapelko T., Stančikaitė M., Subetto D. Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin // Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer Verlag, 2015. P. 25–50.
8. Борзенкова И.И., Борисова О.К., Жильцова Е.Л., Сапелько Т.В. Холодные эпизоды раннего голоцена в Северной Европе: анализ эмпирических данных и возможных причин // *Материалы Междунар. конф. «Водные ресурсы: изучение и управление»*: Т. 1. Петрозаводск, 2016. С. 171–177.
9. Alley R.B., Ágústssdóttir A.M. The 8k event: Cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change // *Quaternary Science Reviews*. 2005. V. 24. P. 1123–1149.
10. Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D. Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? // *Nature*. 1985. V. 315. P. 21–26.
11. Clark P.U., Marshall S.J., Clarke G.K.C., Hostetler S.W., Licciardi J.M., Teller J.T. Freshwater forcing of abrupt climate change during the last glaciation // *Science*. 2001. V. 293. P. 283–287.

References

1. Kobashi T., Severinghaus J.P., Brook E.J., Barnola J.-M., Grachev A.M. Precise timing and characterization of abrupt climate change 8200 years ago from air trapped in polar ice. *Quaternary Science Reviews*. 2007, 26: 1212–1222.
2. Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P., Blunier T., Buchardt S.L., Clausen H.B., Cvijanovic I., Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Fischer H., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Anders M., Svensson A.M., Vallelonga P., Vinther B.M., Walker M.J.C., Wheatley J.J., Winstrup M. 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: 14–28.
3. Thomas E.R., Wolff E.W., Mulvaney R., Steffensen J.P., Johnsen S.J., Arrowsmith C., White J.W.C., Vaughn B., Popp T. The 8.2 ka event from Greenland ice cores. *Quaternary Science Reviews*. 2007, 26: 70–81.
4. Fleitmann D., Mudelsee M., Burns S.J., Bradley R.S., Kramers J., Matter A. Evidence for widespread climatic anomaly at around 9.2 ka before present. *Paleoceanography*. 2008, 23: PA1102. doi: 10.1029/2007PA001519.
5. Hoek W.Z., Bos J.A.A. Early Holocene climate oscillations – causes and consequences. *Quaternary Science Reviews*. 2007, 26: 1901–1906.
6. Grachev A.M., Severinghaus J.P. A revised $+10 \pm 4^\circ\text{C}$ magnitude of the abrupt change in Greenland temperature at the Younger Dryas termination using published GISP2 gas isotope data and air thermal diffusion constants. *Quaternary Science Reviews*. 2005, 4: 513–519.
7. Borzenkova I.I., Zorita E., Borisova O.K., Kalniņa L., Kisieliene D., Koff T., Kuznetsov D., Lemdahl G., Sapelko T., Stančikaitė M., Subetto D. Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer Verlag, 2015: 25–50.
8. Borzenkova I.I., Borisova O.K., Zhiltsova E.L., Sapelko T.V. Cool episodes of the early Holocene in the northern Europe: empirical data and possible causes. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Vodnye resursy: izuchenie i upravlenie»*. Proc. of the International Conference. V. 1. Petrozavodsk, 2016: 171–177. [In Russian].
9. Alley R.B., Ágústssdóttir A.M. The 8k event: Cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change. *Quaternary Science Reviews*. 2005, 24: 1123–1149.
10. Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D. Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? *Nature*. 1985, 315: 21–26.
11. Clark P.U., Marshall S.J., Clarke G.K.C., Hostetler S.W., Licciardi J.M., Teller J.T. Freshwater forcing of abrupt climate change during the last glaciations. *Science*. 2001, 293: 283–287.

12. Dixit Y., Hodell D.A., Sinha R., Petrie C.A. Abrupt weakening of the Indian summer monsoon at 8.2 kyr B.P. // *Earth Planetary Science Letters*. 2014. V. 391. P. 16–23.
13. Борзенкова И.И. История оледенения арктического бассейна: взгляд из прошлого для оценки возможных изменений в будущем // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 2. С. 221–234. doi: 10.15356/2076-6734-2016-2-221-234
14. Morrill C., Jacobsen R.M. How widespread were climate anomalies 8200 years ago? // *Geophys. Research Letters*. 2005. V. 32. L19701. doi:10.1029/2005GL023536.
15. Morrill C., Anderson D.M., Bauer B.A., Buckner R., Gille E.P., Gross W.S., Hartman M., Shah A. Proxy benchmarks for intercomparison of 8.2 ka simulations // *Climate Past*. 2013. V. 9. P. 423–432.
16. Rohling E.J., Pälike H. Centennial-scale climate cooling with a sudden cold event around 8,200 years ago // *Nature*. 2005. V. 434. P. 975–979.
17. Seppä H., Birks H.J.B., Giesecke T., Hammarlund D., Alenius T., Antonsson K., Bjune A.E., Heikkilä M., MacDonald G.M., Ojala A.E.K., Telford R.J., Veski S. Spatial structure of the 8200 cal yr BP event in Northern Europe // *Climate Past*. 2007. V. 3. P. 165–195.
18. Seppä H., Birks H.J.B. Holocene climate reconstructions from the Fennoscandian tree-line area based on pollen data from Toskaljavri // *Quaternary Research*. 2002. V. 57. P. 191–199.
19. Veski S., Seppä H., Ojala A.E.K. Cold event at 8200 yr BP recorded in annually laminated lake sediments in eastern Europe // *Geology*. 2004. V. 32. P. 681–684.
21. Wiersma A.P., Renssen H., Goosse H., Fichefet T. Evaluation of different freshwater forcing scenarios for the 8.2 ka BP event in a coupled climate model // *Climate Dynamics*. 2006. V. 27. P. 831–849.
22. Daley T.J., Thomas E.R., Holmes J.A., Street-Perrott F.A., Chapman M.R., Tindall J.C., Valdes P.J., Loader N.J., Marshall J.D., Wolff E.W., Hopley P.J., Atkinson T.C., Barber K.E., Fisher E.H., Robertson I., Roberts C.N. The 8200 yr BP cold event in stable isotope records from the North Atlantic region // *Global and Planetary Change*. 2011. V. 79. P. 288–302.
23. Boch R., Spötl C., Kramers J. High-resolution isotope records of early Holocene rapid climate change from two coeval stalagmites of Katerloch Cave, Austria // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. P. 2527–2538.
24. Fohlmeister J., Schröder-Ritzrau A., Scholz D., Spötl C., Riechelmann D.F.C., Mudelsee M., Wackerbarth A., Gerdes A., Riechelmann S., Immenhauser A., Richter D.K., Mangini A. Bunker Cave stalagmites: an archive for central European Holocene climate variability // *Climate Past*. 2012. V. 8. P. 1751–1764.
25. Szeroczyńska K., Zawisza E. Records of the 8200 cal BP cold event reflected in the composition of subfossil Cladocera in the sediments of three lakes in Poland // *Quaternary International*. 2011. V. 233. P. 185–193.
12. Dixit Y., Hodell D.A., Sinha R., Petrie C.A. Abrupt weakening of the Indian summer monsoon at 8.2 kyr B.P. // *Earth Planetary Science Letters*. 2014, 391: 16–23.
13. Borzenkova I.I. History of the sea ice in the Arctic basin: lessons from the past for future. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (2): 221–234. doi: 10.15356/2076-6734-2016-2-221-234 [In Russian].
14. Morrill C., Jacobsen R.M. How widespread were climate anomalies 8200 years ago? *Geophys. Research Letters*. 2005, 32: L19701. doi:10.1029/2005GL023536.
15. Morrill C., Anderson D.M., Bauer B.A., Buckner R., Gille E.P., Gross W.S., Hartman M., Shah A. Proxy benchmarks for intercomparison of 8.2 ka simulations. *Climate Past*. 2013, 9: 423–432.
16. Rohling E.J., Pälike H. Centennial-scale climate cooling with a sudden cold event around 8,200 years ago. *Nature*. 2005, 434: 975–979.
17. Seppä H., Birks H.J.B., Giesecke T., Hammarlund D., Alenius T., Antonsson K., Bjune A.E., Heikkilä M., MacDonald G.M., Ojala A.E.K., Telford R.J., Veski S. Spatial structure of the 8200 cal yr BP event in Northern Europe. *Climate Past*. 2007, 3: 165–195.
18. Seppä H., Birks H.J.B. Holocene climate reconstructions from the Fennoscandian tree-line area based on pollen data from Toskaljavri. *Quaternary Research*. 2002, 57: 191–199.
19. Veski S., Seppä H., Ojala A.E.K. Cold event at 8200 yr BP recorded in annually laminated lake sediments in eastern Europe. *Geology*. 2004, 32: 681–684.
21. Wiersma A.P., Renssen H., Goosse H., Fichefet T. Evaluation of different freshwater forcing scenarios for the 8.2 ka BP event in a coupled climate model. *Climate Dynamics*. 2006, 27: 831–849.
22. Daley T.J., Thomas E.R., Holmes J.A., Street-Perrott F.A., Chapman M.R., Tindall J.C., Valdes P.J., Loader N.J., Marshall J.D., Wolff E.W., Hopley P.J., Atkinson T.C., Barber K.E., Fisher E.H., Robertson I., Roberts C.N. The 8200 yr BP cold event in stable isotope records from the North Atlantic region. *Global and Planetary Change*. 2011, 79: 288–302.
23. Boch R., Spötl C., Kramers J. High-resolution isotope records of early Holocene rapid climate change from two coeval stalagmites of Katerloch Cave, Austria. *Quaternary Science Reviews*. 2009, 28: 2527–2538.
24. Fohlmeister J., Schröder-Ritzrau A., Scholz D., Spötl C., Riechelmann D.F.C., Mudelsee M., Wackerbarth A., Gerdes A., Riechelmann S., Immenhauser A., Richter D.K., Mangini A. Bunker Cave stalagmites: an archive for central European Holocene climate variability. *Climate Past*. 2012, 8: 1751–1764.
25. Szeroczyńska K., Zawisza E. Records of the 8200 cal BP cold event reflected in the composition of subfossil Cladocera in the sediments of three lakes in Poland. *Quaternary International*. 2011, 233: 185–193.
26. Lauterbach S., Brauer A., Andersen N., Danielpol D.L., Dulski P., Hüls M., Milecka K., Namiotko T,

26. *Lauterbach S., Brauer A., Andersen N., Danielpol D.L., Dulski P., Hüls M., Milecka K., Namietko T., Plessen B., von Grafenstein U., and DECLAKES participants.* Multi-proxy evidence for early to mid-Holocene environmental and climatic changes in northeastern Poland // *Boreas*. 2011. V. 40. P. 57–72.
27. *Dolven J.K., Cortese G., Björklund K.R.* A high-resolution radiolarian-derived paleotemperature record for the Late Pleistocene-Holocene in the Norwegian Sea // *Paleoceanography*. 2002. V. 17. № 4. P. 1072. doi:10.1029/2002PA000780.
28. *Ellison C.R.W., Chapman M.R., Hall I.R.* Surface and deep ocean interactions during the cold climate event 8200 years ago // *Science*. 2006. V. 312. № 5782. P. 1929–1932.
29. *Jennings A., Andrews J., Pearce C., Wilson L., Ólfasdóttir S.* Detrital carbonate peaks on the Labrador shelf, a 13–7 ka template for freshwater forcing from the Hudson Strait outlet of the Laurentide Ice Sheet into the subpolar gyre // *Quaternary Science Reviews*. 2015. V. 107. P. 62–80.
30. *Moros M., Emeis K., Risebrobakken B., Snowball I., Kuijpers A., McManus J., Jansen E.* Sea surface temperatures and ice rafting in the Holocene North Atlantic: Climate influences on northern Europe and Greenland // *Quaternary Science Reviews*. 2004. V. 23. P. 2113–2126.
31. http://www.fluvial-systems.net/Borzenkova_et_al_supplement.html
32. *Leuenberger M.C., Lang C., Schwander J.* Delta ^{15}N measurements as a calibration tool for the paleothermometer and gas-ice age differences: a case study for the 8200 BP event on GRIP ice // *Journ. of Geophys. Research*. 1999. V. 1 (D18). P. 22,163–22,170.
33. *Monnin E., Steig E.J., Siegenthaler U., Kawamura K., Schwander J., Stauffer B., Stocker T.F., Morse D.L., Barnola J.-M., Bellier B., Raynaud D., Fischer H.* Evidence for substantial accumulation rate variability in Antarctica during the Holocene, through synchronization of CO_2 in the Taylor Dome, Dome C and DML ice cores // *Earth Planetary Science Letters*. 2004. V. 224. P. 45–54.
34. *Ahn J., Brook E.J., Buizert C.* Response of atmospheric CO_2 to abrupt cooling event 8200 years ago // *Geophys. Research Letters*. 2014. V. 41. P. 604–609.
35. *Holmes J.A., Tindall J., Roberts N., Marshall W., Marshall J.D., Bingham A., Feaser I., O'Connell M., Atkinson T., Jourdan A.-L., March A., Fisher E.H.* Lake isotope records of the 8200-year cooling event in western Ireland: Comparison with model simulations // *Quaternary Science Reviews*. 2016. V. 131. P. 341–349.
36. *von Grafenstein U., Erlenkeuser H., Müller J., Jouzel J., Johnsen S.J.* The cold event 8200 years ago documented in oxygen isotope records of precipitation in Europe and Greenland // *Climate Dynamics*. 1998. V. 14. P. 73–81.
37. *Giraudeau J., Jennings A.E., Andrews J.T.* Timing and mechanisms of surface and intermediate water circulation changes in the Nordic Seas over the last 10,000 cal. years: a view from the North Iceland shelf. *Quaternary Science Reviews*. 2004. V. 23: 2127–2139.
- Plessen B., von Grafenstein U., and DECLAKES participants.* Multi-proxy evidence for early to mid-Holocene environmental and climatic changes in northeastern Poland. *Boreas*. 2011, 40: 57–72.
27. *Dolven J.K., Cortese G., Björklund K.R.* A high-resolution radiolarian-derived paleotemperature record for the Late Pleistocene-Holocene in the Norwegian Sea. *Paleoceanography*. 2002, 17 (4): 1072. doi: 10.1029/2002PA000780.
28. *Ellison C.R.W., Chapman M.R., Hall I.R.* Surface and deep ocean interactions during the cold climate event 8200 years ago. *Science*. 2006, 312 (5782): 1929–1932.
29. *Jennings A., Andrews J., Pearce C., Wilson L., Ólfasdóttir S.* Detrital carbonate peaks on the Labrador shelf, a 13–7 ka template for freshwater forcing from the Hudson Strait outlet of the Laurentide Ice Sheet into the subpolar gyre. *Quaternary Science Reviews*. 2015, 107: 62–80.
30. *Moros M., Emeis K., Risebrobakken B., Snowball I., Kuijpers A., McManus J., Jansen E.* Sea surface temperatures and ice rafting in the Holocene North Atlantic: Climate influences on northern Europe and Greenland. *Quaternary Science Reviews*. 2004, 23: 2113–2126.
31. http://www.fluvial-systems.net/Borzenkova_et_al_supplement.html
32. *Leuenberger M.C., Lang C., Schwander J.* Delta ^{15}N measurements as a calibration tool for the paleothermometer and gas-ice age differences: a case study for the 8200 BP event on GRIP ice. *Journ. of Geophys. Research*. 1999, 1 (D18): 22,163–22,170.
33. *Monnin E., Steig E.J., Siegenthaler U., Kawamura K., Schwander J., Stauffer B., Stocker T.F., Morse D.L., Barnola J.-M., Bellier B., Raynaud D., Fischer H.* Evidence for substantial accumulation rate variability in Antarctica during the Holocene, through synchronization of CO_2 in the Taylor Dome, Dome C and DML ice cores. *Earth Planetary Science Letters*. 2004, 224: 45–54.
34. *Ahn J., Brook E.J., Buizert C.* Response of atmospheric CO_2 to abrupt cooling event 8200 years ago. *Geophys. Research Letters*. 2014, 41: 604–609.
35. *Holmes J.A., Tindall J., Roberts N., Marshall W., Marshall J.D., Bingham A., Feaser I., O'Connell M., Atkinson T., Jourdan A.-L., March A., Fisher E.H.* Lake isotope records of the 8200-year cooling event in western Ireland: Comparison with model simulations. *Quaternary Science Reviews*. 2016, 131: 341–349.
36. *von Grafenstein U., Erlenkeuser H., Müller J., Jouzel J., Johnsen S.J.* The cold event 8200 years ago documented in oxygen isotope records of precipitation in Europe and Greenland. *Climate Dynamics*. 1998, 14: 73–81.
37. *Giraudeau J., Jennings A.E., Andrews J.T.* Timing and mechanisms of surface and intermediate water circulation changes in the Nordic Seas over the last 10,000 cal. years: a view from the North Iceland shelf. *Quaternary Science Reviews*. 2004, 23: 2127–2139.

- years: a view from the North Iceland shelf // *Quaternary Science Reviews*. 2004. V. 23. P. 2127–2139.
38. *Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C., Guiot J.* The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data // *Quaternary Science Reviews*. 2003. V. 22. P. 1701–1716.
 39. *Tinner W., Lotter A.F.* Central European vegetation response to abrupt climate change at 8.2 ka // *Geology*. 2001. V. 29. P. 551–554.
 40. *Antonsson K., Seppä H.* Holocene temperatures in Bohuslän, southwest Sweden: a quantitative reconstruction from fossil pollen data // *Boreas*. 2007. V. 36. P. 400–410.
 41. *Heikkilä M., Seppä H.* A 11,000 yr palaeotemperature reconstruction from the southern boreal zone in Finland // *Quaternary Science Reviews*. 2003. V. 22. P. 541–554.
 42. *Heikkilä M., Seppä H.* Holocene climate dynamics in Latvia, eastern Baltic region: a pollen-based summer temperature reconstruction and regional comparison // *Boreas*. 2010. V. 39. № 4. P. 705–719.
 43. *Ojala A.E.K., Heinsalu A., Kauppila T., Alenius T., Saaristo M.* Characterizing changes in the sedimentary environment of a varved lake sediment record in southern central Finland around 8000 cal. yr BP // *Journ. of Quaternary Science*. 2008. V. 23 (8). P. 765–775.
 44. *Seppä H., Poska A.* Holocene annual mean temperature changes in Estonia and their relationship to solar insolation and atmospheric circulation patterns // *Quaternary Research*. 2004. V. 61. P. 22–31.
 45. *Stančikaitė M., Kisieliene D., Moe D., Vaikutienė G.* Lateglacial and early Holocene environmental changes in northeastern Lithuania // *Quaternary International*. 2009. V. 207. P. 80–92.
 46. *Velle G., Brooks S.J., Birks H.J.B., Willassen E.* Chironomids as a tool for inferring Holocene climate: an assessment based on six sites in southern Scandinavia // *Quaternary Science Reviews*. 2005. V. 24. P. 1429–1462.
 47. *Šeirienė V., Stančikaitė M., Kisieliene D., Šinkūnas P.* Lateglacial environment inferred from palaeobotanical and ^{14}C data of sediment sequence from Lake Kašučiai, West Lithuania // *Baltica*. 2006. V. 19. № 2. P. 80–90.
 48. *Snowball I., Muscheler R., Zillén L., Sandgren P., Stanton T., Ljung K.* Radiocarbon wiggle matching of Swedish lake varves reveals asynchronous climate changes around the 8.2 kyr cold event // *Boreas*. 2010. V. 39. P. 720–733.
 49. *Novenko E.Yu., Tsyganov A.N., Volkova E.M., Babeshko K.V., Lavrentiev N.V., Payne R.J., Mazei Yu.A.* The Holocene paleoenvironmental history of central European Russia reconstructed from pollen, plant macrofossil, and testate amoeba analyses of the Klukva peatland, Tula region // *Quaternary Research*. 2015. V. 83. № 3. P. 459–468.
 50. *Nesje A., Dahl S.O.* The Greenland 8200 cal. yr BP event detected in loss-on-ignition profiles in Norwegian lacustrine sediment sequences. *Journ. of Quaternary Science*. 2001. V. 16. P. 155–166.
 51. *Bjune A.E., Birks H.J.B., Seppä H.* Holocene vegetation and climate history on a continental-oceanic

51. Bjune A.E., Birks H.J.B., Seppä H. Holocene vegetation and climate history on a continental-oceanic transect in northern Fennoscandia based on pollen and plant macrofossils from lakes situated at or near the present tree-line // *Boreas*. 2004. V. 33. P. 211–223.
52. Barber D.C., Dyke A., Hillaire-Marcel C., Jennings A.E., Andrews J.T., Kerwin M.W., Bilodeau G., McNeely R., Southon J., Morehead M.D., Gagnon J.-M. Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes // *Nature*. 1999. V. 400. P. 344–348.
53. Clarke G. K. C., Leverington D.W., Teller J.T., Dyke A.S. Paleohydraulics of the last outburst flood from glacial Lake Agassiz and the 8200 BP cold event // *Quaternary Science Reviews*. 2004. V. 23. P. 389–407.
54. Stouffer R.J., Gregory J.M., Dixon K.W., Spelman M.J., Hurlin W., Weaver A.J., Eby M., Flato G.M., Hasumi H., Hu A., Jungclaus J.H., Kamenkovich I.V., Levermann A., Montoya M., Murakami S., Nawrath S., Oka A., Peltier W.R., Robitaille D.Y., Sokolov A., Vettoretti G., Weber S.L. Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes // *Journ. of Climate*. 2006. V. 19. P. 1365–1387.
55. Herold N., Yin Q.Z., Karami M.P., Berger A. Modeling the climatic diversity of the warm interglacials // *Quaternary Science Reviews*. 2012. V. 56. P. 126–141.
56. Bos J.A.A., van Geel B., van der Plicht J., Bohncke S.J.P. Preboreal climate oscillations in Europe: Wiggle-match dating and synthesis of Dutch high-resolution multi-proxy records // *Quaternary Science Reviews*. 2007. V. 26. P. 1927–1950.
57. Hoffman J.S., Carlson A.E., Winsor K., Klinkhammer G.P., LeGrande A.N., Andrews J.T., Strasser J.C. Linking the 8.2 ka event and its freshwater forcing in the Labrador Sea // *Geophys. Research Letters*. 2012. V. 39. P. L18703. doi:10.1029/2012GL053047.
58. Li Y.-X., Tornqvist T.E., Nevitt J.M., Kohl B. Synchronizing a sea-level jump, final Lake Agassiz drainage, and abrupt cooling 8200 years ago // *Earth Planetary Science Letters*. 2012. V. 315–316. P. 41–50.
59. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014. 1535 p.
60. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Шикломанов А.И., Голованов О.Ф. Новые данные о стоке крупнейших рек, впадающих в Северный Ледовитый океан // *Полярная криосфера и воды суши*. Москва – Санкт-Петербург: Paulsen, ААНИИ, 2011. С. 263–287.
61. Rahmstorf S., Box J., Feulner G., Mann M., Robinson A., Rutherford S., Schaffernicht E. Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation // *Nature Climate Change*. 2015. V. 5. P. 475–480.
- transect in northern Fennoscandia based on pollen and plant macrofossils from lakes situated at or near the present tree-line. *Boreas*. 2004, 33: 211–223.
52. Barber D.C., Dyke A., Hillaire-Marcel C., Jennings A.E., Andrews J.T., Kerwin M.W., Bilodeau G., McNeely R., Southon J., Morehead M.D., Gagnon J.-M. Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes. *Nature*. 1999, 400: 344–348.
53. Clarke G.K.C., Leverington D.W., Teller J.T., Dyke A.S. Paleohydraulics of the last outburst flood from glacial Lake Agassiz and the 8200 BP cold event. *Quaternary Science Reviews*. 2004, 23: 389–407.
54. Stouffer R.J., Gregory J.M., Dixon K.W., Spelman M.J., Hurlin W., Weaver A.J., Eby M., Flato G.M., Hasumi H., Hu A., Jungclaus J.H., Kamenkovich I.V., Levermann A., Montoya M., Murakami S., Nawrath S., Oka A., Peltier W.R., Robitaille D.Y., Sokolov A., Vettoretti G., Weber S.L. Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes. *Journ. of Climate*. 2006, 19: 1365–1387.
55. Herold N., Yin Q.Z., Karami M.P., Berger A. Modeling the climatic diversity of the warm interglacials. *Quaternary Science Reviews*. 2012, 56: 126–141.
56. Bos J.A.A., van Geel B., van der Plicht J., Bohncke S.J.P. Preboreal climate oscillations in Europe: Wiggle-match dating and synthesis of Dutch high-resolution multi-proxy records. *Quaternary Science Reviews*. 2007, 26: 1927–1950.
57. Hoffman J.S., Carlson A.E., Winsor K., Klinkhammer G.P., LeGrande A.N., Andrews J.T., Strasser J.C. Linking the 8.2 ka event and its freshwater forcing in the Labrador Sea. *Geophys. Research Letters*. 2012, 39: L18703. doi: 10.1029/2012GL053047.
58. Li Y.-X., Tornqvist T.E., Nevitt J.M., Kohl B. Synchronizing a sea-level jump, final Lake Agassiz drainage, and abrupt cooling 8200 years ago. *Earth Planetary Science Letters*. 2012, 315–316: 41–50.
59. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014: 1535 p.
60. Shiklomanov I.A., Georgiyevskiy V.Yu., Shiklomanov A.I. New data about the discharge of the largest rivers contributing into the Arctic Ocean. *Polar Cryosphere and Continental Waters*. Moscow – Sankt-Petersburg. Paulsen Editions: AARI, 2011: 263–287. [In Russian].
61. Rahmstorf S., Box J., Feulner G., Mann M., Robinson A., Rutherford S., Schaffernicht E. Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change*. 2015, 5: 475–480.