

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 523.98+551.5590.21

doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.135-165

## ХРОНОЛОГИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ КЛИМАТА В ГОЛОЦЕНЕ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ И КОРРЕЛЯЦИЯ С ВАРИАЦИЯМИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

*Х.А. Арсланов<sup>1</sup>, В.А. Дергачев<sup>2</sup>, Ф.Е. Максимов<sup>1</sup>, И.В. Кудрявцев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет,  
г. Санкт-Петербург, 199034, Россия*

<sup>2</sup>*Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН,  
г. Санкт-Петербург, 194021, Россия*

### Аннотация

Более точное определение возраста радиоуглеродным методом короткопериодных изменений климата в голоцене требует учета короткопериодных изменений концентрации  $^{14}\text{C}$  в атмосфере, которые приводят к ошибке датирования до 300 лет. Для исключения данной погрешности была использована модель К. Бронка Рамсея, основанная на сопоставлении радиоуглеродной хронологии изучаемого разреза с хронологией калибровочной кривой. С помощью этой модели был установлен скорректированный (смоделированный) возраст всей серии ранее определенных нами радиоуглеродных датировок образцов, отобранных из разрезов верховых болот Никольско-Лютинское, Ширинский Мох и Самбальское на Северо-Западе России. Значения отклонений среднегодовой температуры от ее современного значения ( $\Delta T$ , °C), приведенные в работах в виде графика, были преобразованы в цифровые значения. В итоге был определен смоделированный возраст, наиболее приближенный к календарному возрасту и соответствующим значениям  $\Delta T$  всей серии датированных образцов. Определена хронология короткопериодных изменений климата в голоцене, которая демонстрирует синхронность короткопериодных изменений климата в окрестностях изученных разрезов болотных отложений. Данная хронология в большинстве случаев согласуется с хронологией, полученной при изучении природных объектов (озерные, болотные и морские отложения, полярные ледники) во многих регионах мира, а также с хронологией наступания горных ледников.

Хронология короткопериодных изменений климата сопоставлена с хронологией изменений солнечной активности, установленной путем определения концентрации космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$  в древесных кольцах известного возраста и  $^{10}\text{Be}$  в полярных ледниках. Установлена синхронность короткопериодных изменений климата и изменений солнечной активности в голоцене, которая демонстрирует, что изменения солнечной активности являются одной из основных причин короткопериодных изменений климата в голоцене.

**Ключевые слова:** болотные отложения, радиоуглеродное датирование, коррекция возраста моделированием, реконструкция палеоклиматов, космогенные изотопы, корреляция изменения климата и солнечной активности

### Введение

Реконструкция долгопериодных и короткопериодных (несколько сотен лет) изменений климата в течение голоцена и позднеледниковья является актуальной

задачей. Для выявления и более точного датирования короткопериодных изменений климатических параметров необходимо использовать более точную хронологию, основанную на более детальном палинологическом и геохронологическом ( $^{14}\text{C}$ ) изучении непрерывно формировавшейся толщи болотных отложений и реконструкции на их основе количественных параметров климата.

В ходе проведенных ранее исследований [1–3] на территории Новгородской и Ленинградской областей были изучены шесть разрезов верховых болот (Никольско-Лютинское, Ширинский мох, Ламмин-Суо, Саккала, Мшинское, Суо) и два разреза озерных отложений (озера Вишневское и Лемболовское). Образцы осадков для последующего спорово-пыльцевого анализа и радиоуглеродного датирования в НИИ географии Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) отбирали через каждые 10 см по всей длине керна. Реконструкция количественных параметров климата изученных разрезов была проведена в Институте географии РАН В.А. Климановым [1, 2] с использованием информационно-статистического метода, основанного на статистической корреляции между спорово-пыльцевыми спектрами и современными климатическими условиями, соответствующими второй половине XX в. [4]. Хронология палеоклиматических событий была построена с использованием почти 300 радиоуглеродных датировок, выполненных в лаборатории СПбГУ. Аналогичное исследование верхового болота Самбальское на юге Карелии было проведено Г.А. Елиной с соавторами [5]. Из этих отложений нами были продатированы 50 образцов.

На основе выполненных исследований была представлена хронология изменений растительности и климата Северо-Запада России в позднеледниковье и голоцене, которая включает серию короткопериодных этапов потеплений и похолоданий продолжительностью в несколько сотен лет.

Были определены количественные параметры климата этапов потеплений и похолоданий в позднеледниковье и во всех климатических периодах голоцена и этапов похолоданий между всеми смежными климатическими периодами и в малом ледниковом периоде.

## 1. Методы

Более точному определению возраста короткопериодных вариаций климата препятствуют короткопериодные вариации концентрации  $^{14}\text{C}$  в атмосфере, которые имели место в голоцене и в более ранние периоды [6]. Эти вариации создают на линейных участках калибровочной кривой, построенной путем датирования годовых колец деревьев известного возраста, изгибы и плато концентрации  $^{14}\text{C}$ . В качестве примера можно отметить интервал, где  $^{14}\text{C}$ -возраст, равный 2430–2500 лет, на графике (см. рис. 1) принимает вид плато протяженностью около 300 календарных лет (2370–2670 кал. л.) [7]. В болотных отложениях, формировавшихся, например, со скоростью 1 мм/год, из-за наличия данного плато практически одинаковый  $^{14}\text{C}$ -возраст (~2500  $^{14}\text{C}$ -лет) будет наблюдаться на протяжении 30 см слоя торфа, образовавшегося в течение 300 кал. л. Подобные интервалы короткопериодных вариаций концентрации  $^{14}\text{C}$  отмечаются на ряде участков калибровочной кривой, на которых скорректированный возраст по калибровочным программам определяется с большей ошибкой [6–8].

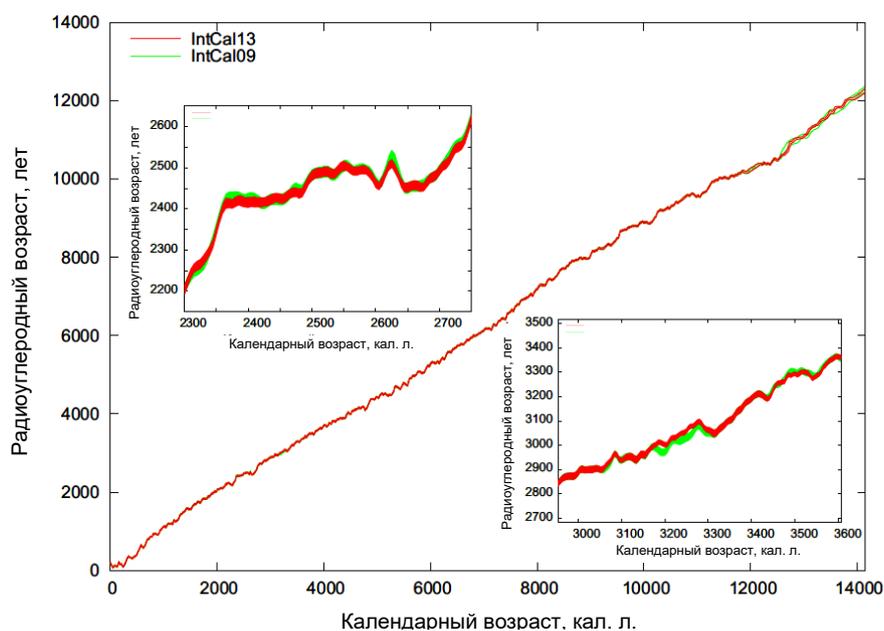


Рис. 1. Калибровочная кривая IntCal13 для периода 0–14000 лет, полученная путем датирования древесных колец известного календарного возраста. На вставках приведены интервалы, где заметны изменения в калибровочной кривой: сверху интервал 2350–2750 кал. л., внизу интервал 2900–3100 кал. л. Красной линией указана калибровочная кривая IntCal13 [7] и зеленой – калибровочная кривая IntCal09 [8]

В реконструкциях климата, выполненных в 1995–2001 гг., данная коррекция возраста не вводилась. Поскольку величина этой коррекции сравнима с продолжительностью короткопериодных изменений климата, ее необходимо учитывать.

За последние два десятилетия были разработаны модели «глубина – возраст», которые позволяют ввести коррекцию на вышеуказанные короткопериодные вариации концентрации  $^{14}\text{C}$ . Эти модели основаны на сопоставлении радиоуглеродной хронологии изучаемого разреза с хронологией калибровочной кривой, построенной по данным датирования годичных колец деревьев известного возраста [9, 10]. Однако для успешного применения такой методологии коррекции возраста необходимо, чтобы образцы на датирование болотных отложений отбирались с интервалами не более 5–10 см. Примечательно, что ранее отбор проб на датирование из вышеупомянутых болотных отложений нами проводился в основном из каждого 10-сантиметрового слоя по всей толще, что дает возможность применить модель К. Бронка Рамсея [9, 10] для коррекции возраста и тем самым позволяет увеличить точность датирования короткопериодных изменений климатических параметров.

В настоящей работе мы, применяя метод К. Бронка Рамсея, определили смоделированный возраст всей серии полученных нами радиоуглеродных датировок образцов, полученных из трех наиболее мощных (6.5–7.0 м) ранее изученных болотных отложений на Северо-Западе России: разрезом Никольско-Лютинское, расположенного на водоразделе рек Люта и Лемека в юго-восточной части Приильменской низменности, Ширинский Мох в Киришском районе Ленинградской области и Самбальское в южной Карелии. Для всех этих разрезов В.А. Климановым

на основе данных спорово-пыльцевого анализа, выполненного Л.А. Савельевой, Н.Л. Гей и Г.А. Елиной, были определены величины отклонений среднегодовой температуры от ее современного значения ( $\Delta T$ , °C) в графическом виде  $^{14}\text{C}$ -возраст –  $\Delta T$ , °C [1, 5]. Для дальнейшего анализа и получения количественных оценок графическое представление ( $\Delta T$ , °C) было преобразовано в цифровое. Полученные значения смоделированного возраста этапов похолоданий и потеплений в изученных разрезах мы сопоставили с хронологией короткопериодных этапов похолоданий и потеплений, выявленных на основе изучения большого количества палеоклиматических данных для наземных природных архивов, и динамики горных ледников, высокочувствительных к короткопериодным изменениям климата.

Мы также сравнили хронологию короткопериодных вариаций климата, полученную путем изучения наземных природных архивов, с хронологией подобных вариаций климата, установленной путем измерения содержания космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  в годичных кольцах деревьев известного возраста и в полярных ледниках. Скорость образования этих изотопов в атмосфере находится в пропорциональной зависимости от интенсивности солнечной активности и общего солнечного излучения.

## 2. Результаты и их обсуждение

**2.1. Установление скорректированного возраста короткопериодных этапов изменений климата путем моделирования в голоцене на Северо-Западе России.** Определение моделированного возраста проводилось с использованием калибровочной программы OxCal v4.3.2 (модели P\_Sequence [9, 10]). Полученные результаты (в качестве примера) для Никольско-Лютинского болота представлены на графике «глубина – смоделированный возраст» (рис. 2).

В табл. 1–3 для всех исследованных болот приведены данные радиоуглеродного, калиброванного и смоделированного возрастов и соответствующие датировкам величины отклонений среднегодовой температуры  $\Delta T$  от ее современного значения. Полученные значения  $\Delta T$  для изученных разрезов в едином масштабе смоделированного возраста показаны на рис. 3.

В табл. 4 приведены интервалы смоделированного возраста этапов похолоданий и потеплений и соответствующие им отклонения среднегодовой температуры для изученных трех разрезов болотных отложений.

При корреляции приведенных в табл. 1–3 значений возраста и  $\Delta T$  образцов из данных разрезов необходимо учитывать погрешности определения этих величин. Большинство датировок были определены со статистической ошибкой до 100 лет, но несколько образцов было датировано с ошибкой вплоть до 140–250 лет. На участках калибровочной кривой, где наблюдаются осцилляции концентрации  $^{14}\text{C}$  из-за короткопериодных вариаций содержания  $^{14}\text{C}$  в атмосфере, калиброванный возраст определяется по калибровочным программам в более широком интервале возраста. В табл. 1–3  $^{14}\text{C}$ -возраст и калиброванный возраст даны со статистической ошибкой  $\delta$ , соответствующей доверительному интервалу 68.3%. Калиброванный возраст большинства датированных образцов в пределах ошибки  $\pm 2\delta$  соответствует доверительному интервалу 95.4% и согласуется с смоделированным возрастом.

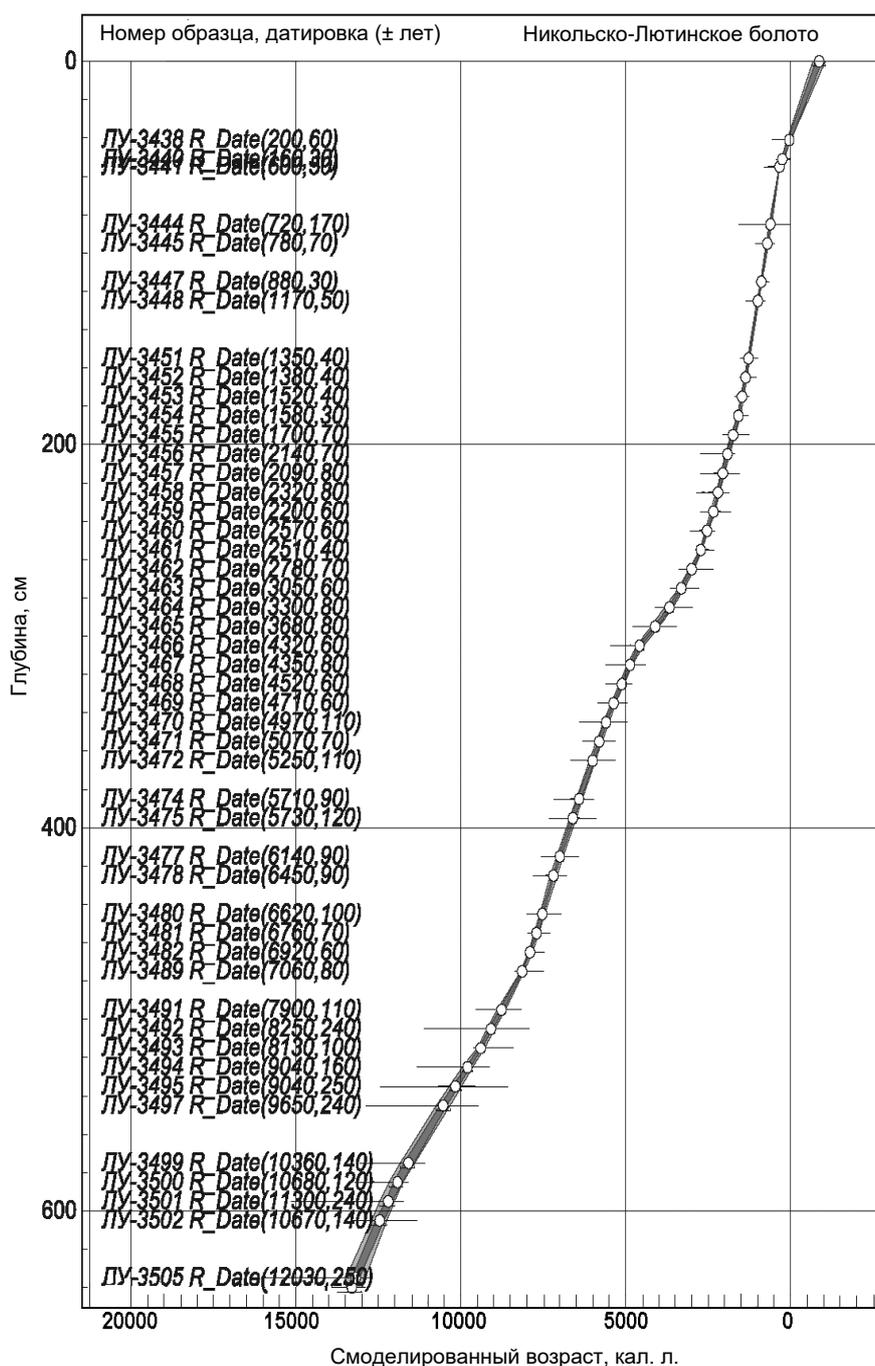


Рис. 2. Зависимость «глубина – возраст» для образцов торфа верхового болота Никольско-Лютинское, построенная с использованием калибровочной программы OxCal v4.3.2 [10]; на основе калибровочной кривой IntCal 13 [7]. Использовалась модель P\_Sequence [9] К. Бронка Рамсея (<https://c14.arch.ox.ac.uk>). На графиках показаны номер образца (индекс), его некалиброванный радиоуглеродный возраст и ошибка датирования. Например, ЛУ-3440 R.Date (160,30) соответствует ЛУ-3440,  $160 \pm 30$  лет в табл. 1. Смоделированный возраст, кал. л., означает калиброванный возраст с учетом коррекции на короткопериодичные вариации  $^{14}\text{C}$  в атмосфере и/или кратковременные вариации концентрации  $^{14}\text{C}$ , связанные с другими причинами, например с привнесом в образец аллохтонного более молодого (корнями растений) или более древнего переотложенного углерода

Табл. 1

Радиоуглеродный и смоделированный возраст и значение отклонения среднегодовой температуры ( $\Delta T$ ) образцов из отложений болота Никольско-Люгинское

Номер образца	Интервал, см	$^{14}\text{C}$ -возраст, лет	Калиброванный возраст, кал. л.	Смоделированный возраст, кал. л.	$\Delta T$ , °C
ЛУ-3440	50–52	160 ± 30	154 ± 85	253 ± 25	–1.6
ЛУ-3441	50–60	600 ± 50	598 ± 37	339 ± 5	–0.20
ЛУ-3444	80–90	720 ± 170	703 ± 147	614 ± 21	–1.6
ЛУ-3445	90–100	780 ± 70	728 ± 67	706 ± 19	–0.27
ЛУ-3447	110–120	880 ± 30	804 ± 54	890 ± 12	–1.2
ЛУ-3448	120–130	1170 ± 50	1096 ± 69	992 ± 16	0.13
ЛУ-3451	150–160	1350 ± 40	1271 ± 38	1275 ± 19	0.98
ЛУ-3452	160–170	1380 ± 40	1301 ± 31	1365 ± 20	0.98
ЛУ-3453	170–180	1520 ± 40	1422 ± 56	1474 ± 25	–0.86
ЛУ-3454	180–190	1580 ± 30	1469 ± 39	1584 ± 29	–0.87
ЛУ-3455	190–200	1700 ± 70	1615 ± 88	1744 ± 35	0.81
ЛУ-3456	200–210	2140 ± 70	2141 ± 102	1916 ± 30	1.4
ЛУ-3457	210–220	2090 ± 80	2080 ± 110	2058 ± 30	1.1
ЛУ-3458	220–230	2320 ± 80	2366 ± 144	2201 ± 28	0.34
ЛУ-3459	230–240	2200 ± 60	2210 ± 78	2339 ± 29	1.5
ЛУ-3460	240–250	2570 ± 60	2637 ± 99	2536 ± 26	0.50
ЛУ-3461	250–260	2510 ± 40	2597 ± 84	2723 ± 16	0.04
ЛУ-3462	260–270	2780 ± 70	2897 ± 83	3001 ± 42	0.96
ЛУ-3463	270–280	3050 ± 60	3247 ± 82	3317 ± 43	0.14
ЛУ-3464	280–290	3300 ± 80	3538 ± 93	3675 ± 61	1.9
ЛУ-3465	290–300	3680 ± 80	4023 ± 116	4105 ± 62	2.0
ЛУ-3466	300–310	4320 ± 60	4917 ± 89	4582 ± 45	–1.1
ЛУ-3467	310–320	4350 ± 80	4977 ± 132	4869 ± 38	–1.1
ЛУ-3468	320–330	4520 ± 60	5165 ± 104	5119 ± 40	0.89
ЛУ-3469	330–340	4710 ± 60	5445 ± 83	5365 ± 34	0.22
ЛУ-3470	340–350	4970 ± 110	5728 ± 120	5597 ± 43	2.2
ЛУ-3471	350–360	5070 ± 70	5808 ± 79	5803 ± 44	1.6
ЛУ-3472	360–370	5250 ± 110	6037 ± 132	6006 ± 48	0.53
ЛУ-3474	380–390	5710 ± 90	6512 ± 101	6413 ± 48	2.2
ЛУ-3475	390–400	5730 ± 120	6540 ± 131	6605 ± 48	2.2
ЛУ-3477	410–420	6140 ± 90	7031 ± 118	6997 ± 47	0.94
ЛУ-3478	420–430	6450 ± 90	7363 ± 82	7191 ± 44	–0.04
ЛУ-3480	440–450	7060 ± 80	7879 ± 79	7529 ± 39	1.9
ЛУ-3481	450–460	6760 ± 70	7617 ± 58	7701 ± 38	0.17
ЛУ-3482	460–470	6920 ± 60	7760 ± 65	7902 ± 30	1.7
ЛУ-3489	470–480	6620 ± 100	7508 ± 80	8139 ± 28	0.98
ЛУ-3491	490–500	7900 ± 110	8762 ± 151	8767 ± 63	–0.09
ЛУ-3492	500–510	8250 ± 240	9180 ± 303	9085 ± 60	–1.5
ЛУ-3493	510–520	8130 ± 100	9073 ± 166	9397 ± 50	–1.5
ЛУ-3494	520–530	9040 ± 160	10153 ± 239	9792 ± 77	–0.32
ЛУ-3495	530–540	9040 ± 250	10181 ± 351	10164 ± 92	–0.32
ЛУ-3497	540–560	9650 ± 240	11032 ± 371	10534 ± 103	–3.0
ЛУ-3499	570–580	10360 ± 140	12177 ± 248	11589 ± 118	–4.5
ЛУ-3500	580–590	10680 ± 120	12587 ± 129	11922 ± 114	–6.0
ЛУ-3505	630–640	12030 ± 250	14036 ± 393	13191 ± 132	–3.2

Табл. 2

Радиоуглеродный и смоделированный возраст и значение отклонения среднегодовой температуры ( $\Delta T$ ) образцов из отложений болота Ширинский Мох

Номер образца	Интервал, см	$^{14}\text{C}$ -возраст, лет	Калиброванный возраст, кал. л.	Смоделированный возраст, кал. л.	$\Delta T$ , °C
ЛУ-3320	40–42	30 ± 50	120 ± 80	120 ± 20	–1.1
ЛУ-3321	46–48	100 ± 40	130 ± 80	150 ± 20	–0.52
ЛУ-3325	70–80	240 ± 50	250 ± 120	420 ± 20	–0.42
ЛУ-3326	80–90	410 ± 50	440 ± 60	520 ± 20	0.030
ЛУ-3327	90–100	480 ± 60	510 ± 60	650 ± 20	–0.42
ЛУ-3328	100–110	980 ± 40	880 ± 50	920 ± 30	1.0
ЛУ-3329	110–120	1320 ± 50	1240 ± 50	1210 ± 30	0.19
ЛУ-3330	120–130	1600 ± 60	1490 ± 70	1470 ± 40	0.21
ЛУ-3331	130–140	1820 ± 40	1750 ± 60	1730 ± 30	0.87
ЛУ-3332	140–150	2010 ± 30	1960 ± 40	1960 ± 30	0.94
ЛУ-3333	150–160	2380 ± 90	2470 ± 140	2190 ± 30	0.17
ЛУ-3334	160–170	2460 ± 60	2550 ± 110	2410 ± 30	0.15
ЛУ-3335	170–180	2430 ± 60	2520 ± 110	2610 ± 40	0.12
ЛУ-3336	180–190	2600 ± 60	2680 ± 100	2820 ± 40	0.38
ЛУ-3337	190–200	2820 ± 60	2940 ± 80	3060 ± 50	1.3
ЛУ-3339	210–220	3230 ± 70	3460 ± 80	3630 ± 60	1.6
ЛУ-3340	220–230	3800 ± 90	4190 ± 130	4010 ± 60	0.68
ЛУ-3341	230–240	4030 ± 70	4540 ± 120	4340 ± 60	–0.24
ЛУ-3342	240–250	4090 ± 60	4630 ± 110	4630 ± 60	–0.54
ЛУ-3343	250–260	4250 ± 70	4780 ± 110	4920 ± 60	–0.15
ЛУ-3344	260–270	4590 ± 80	5270 ± 150	5260 ± 70	1.6
ЛУ-3345	270–280	5030 ± 90	5780 ± 100	5600 ± 60	1.9
ЛУ-3346	280–290	5050 ± 70	5790 ± 80	5850 ± 50	2.0
ЛУ-3347	290–300	5230 ± 80	6020 ± 110	6130 ± 50	2.0
ЛУ-3348	300–310	5500 ± 100	6290 ± 120	6420 ± 50	1.1
ЛУ-3349	310–320	6120 ± 100	7010 ± 130	6760 ± 50	1.1
ЛУ-3351	330–340	6640 ± 80	7520 ± 60	7340 ± 40	0.20
ЛУ-3352	340–350	7030 ± 110	7850 ± 100	7560 ± 40	0.83
ЛУ-3353	350–360	6980 ± 90	7810 ± 90	7740 ± 40	0.88
ЛУ-3354	360–370	7310 ± 100	8140 ± 100	7910 ± 40	0.13
ЛУ-3355	370–380	7540 ± 70	8340 ± 70	8060 ± 20	1.3
ЛУ-3358	400–410	7630 ± 70	8440 ± 60	8430 ± 30	1.0
ЛУ-3359	410–420	7960 ± 70	8820 ± 110	8560 ± 40	0.12
ЛУ-3360	420–430	7890 ± 60	8750 ± 120	8660 ± 40	0.27
ЛУ-3362	440–450	8240 ± 80	9220 ± 110	8870 ± 40	0.18
ЛУ-3363	450–460	8190 ± 80	9170 ± 110	8980 ± 40	0.15
ЛУ-3365	460–470	8230 ± 70	9210 ± 110	9070 ± 30	0.17
ЛУ-3366	470–480	8160 ± 80	9130 ± 120	9160 ± 30	0.13
ЛУ-3367	480–490	8400 ± 60	9410 ± 70	9260 ± 20	1.0
ЛУ-3368	490–500	8580 ± 50	9550 ± 40	9340 ± 20	–1.8
ЛУ-3369	500–510	8400 ± 70	9400 ± 80	9420 ± 20	1.0
ЛУ-3370	510–520	8360 ± 50	9380 ± 70	9510 ± 20	0.79
ЛУ-3371	520–530	8590 ± 70	9580 ± 70	9610 ± 20	–1.6
ЛУ-3372	530–540	8720 ± 80	9740 ± 140	9720 ± 30	–0.51
ЛУ-3373	540–550	8790 ± 80	9850 ± 160	9830 ± 30	–2.9

ЛУ-3375	560–570	8980 ± 70	10090 ± 110	10040 ± 30	–3.0
ЛУ-3377	580–590	9080 ± 60	10250 ± 70	10260 ± 30	–3.4
ЛУ-3378	590–600	8960 ± 80	10050 ± 120	10380 ± 30	–2.8
ЛУ-3379	600–610	9140 ± 130	10330 ± 180	10500 ± 30	–3.0
ЛУ-3380	610–620	9360 ± 80	10580 ± 130	10630 ± 30	–3.5
ЛУ-3383	640–650	9380 ± 100	10630 ± 180	11030 ± 30	–3.8
ЛУ-3384	650–660	9410 ± 90	10680 ± 170	11160 ± 30	–3.9
ЛУ-3385	660–670	9850 ± 100	11330 ± 170	11330 ± 40	–1.4

Табл. 3

Радиоуглеродный и смоделированный возраст и значение отклонения среднегодовой температуры ( $\Delta T$ ) образцов из отложений болота Самбальское

Номер образца	Интервал, см	$^{14}\text{C}$ -возраст, лет	Калиброванный возраст, кал. л.	Смоделированный возраст, кал. л.	$\Delta T$ , °C
ЛУ-2946	65–80	180 ± 70	173 ± 105	331 ± 62	–0.79
ЛУ-2947	80–95	540 ± 60	572 ± 47	576 ± 42	–0.59
ЛУ-2948	102–117	1170 ± 40	1095 ± 61	984 ± 22	0.55
ЛУ-2967	120–135	1270 ± 70	1186 ± 75	1223 ± 35	1.7
ЛУ-3216	135–150	1340 ± 110	1245 ± 115	1423 ± 48	1.3
ЛУ-2969	150–163	1450 ± 70	1369 ± 67	1619 ± 53	0.65
ЛУ-2970	163–175	1900 ± 90	1838 ± 111	1819 ± 43	0.90
ЛУ-2971	175–187	2170 ± 40	2197 ± 76	2017 ± 32	1.5
ЛУ-2972	187–200	2140 ± 60	2143 ± 96	2184 ± 41	1.6
ЛУ-2973	200–212	2180 ± 60	2192 ± 85	2344 ± 44	1.4
ЛУ-2974	212–225	2440 ± 80	2531 ± 116	2580 ± 40	0.48
ЛУ-2975	225–237	2780 ± 60	2889 ± 72	2797 ± 28	0.99
ЛУ-2976	237–250	2780 ± 70	2897 ± 83	2996 ± 35	0.99
ЛУ-2977	250–263	2980 ± 60	3152 ± 94	3209 ± 34	1.4
ЛУ-2978	263–275	3120 ± 50	3325 ± 64	3416 ± 33	0.99
ЛУ-2979	275–287	3490 ± 60	3763 ± 78	3659 ± 37	1.7
ЛУ-2980	287–300	3420 ± 80	3684 ± 104	3896 ± 44	1.6
ЛУ-2981	300–312	3830 ± 80	4236 ± 119	4148 ± 45	1.4
ЛУ-3180	312–325	4120 ± 130	4635 ± 174	4409 ± 44	1.3
ЛУ-3181	325–337	4480 ± 70	5125 ± 119	4633 ± 31	–0.22
ЛУ-3182	337–350	4430 ± 100	5077 ± 146	4815 ± 45	–0.20
ЛУ-3183	350–362	4250 ± 80	4783 ± 127	4962 ± 39	0.64
ЛУ-3184	362–375	4670 ± 70	5410 ± 101	5129 ± 31	0.41
ЛУ-3185	375–387	4550 ± 70	5199 ± 126	5296 ± 26	–0.04
ЛУ-3186	387–400	4750 ± 80	5470 ± 93	5459 ± 27	0.71
ЛУ-3187	400–412	4860 ± 60	5592 ± 75	5615 ± 22	0.85
ЛУ-3188	412–425	5310 ± 70	6095 ± 88	5785 ± 18	2.0
ЛУ-3189	425–437	5350 ± 50	6130 ± 80	6000 ± 26	2.2
ЛУ-3190	437–450	5400 ± 70	6175 ± 91	6088 ± 28	2.3
ЛУ-3191	450–462	5510 ± 90	6304 ± 101	6219 ± 25	1.4
ЛУ-3192	462–475	5590 ± 110	6396 ± 118	6353 ± 26	1.8
ЛУ-3193	475–487	5750 ± 80	6551 ± 91	6477 ± 24	0.94
ЛУ-3194	487–500	5630 ± 60	6413 ± 68	6608 ± 21	1.7
ЛУ-3195	500–517	5980 ± 70	6824 ± 90	6768 ± 20	1.7
ЛУ-3196	517–535	5770 ± 60	6569 ± 71	6945 ± 8	0.96
ЛУ-3197	535–542	6050 ± 200	6920 ± 232	7439 ± 58	1.4

ЛУ-3198	542–550	6920 ± 90	7766 ± 86	7767 ± 58	1.1
ЛУ-3199	550–562	7550 ± 90	8349 ± 92	8246 ± 54	0.87
ЛУ-3200	562–575	8300 ± 90	9283 ± 118	8772 ± 47	-1.5
ЛУ-3201	575–587	8670 ± 90	9698 ± 136	9142 ± 9	-2.8
ЛУ-3202	587–600	8730 ± 120	9800 ± 179	9304 ± 22	-2.5
ЛУ-3203	600–617	7730 ± 110	8554 ± 136	±	0.77
ЛУ-3204	617–635	8410 ± 70	9411 ± 79	9654 ± 34	-1.4
ЛУ-3205	635–642	8510 ± 70	9500 ± 54	9816 ± 40	-2.6
ЛУ-3206	642–650	не датирован	–	–	–
ЛУ-3207	650–662	8970 ± 100	10053 ± 151	10036 ± 39	-2.6
ЛУ-3208	662–675	8890 ± 80	9983 ± 139	10205 ± 37	-1.9
ЛУ-3209	675–685	9130 ± 80	10325 ± 95	10378 ± 45	-3.7
ЛУ-3210	685–690	9260 ± 130	10474 ± 176	10507 ± 52	-3.7

Заметную ошибку датирования может вызвать проникновение корешков и корневищ болотных растений, например пушицы и кустарничков, в нижележащие слои, что приводит к инверсии возраста в разрезе торфяника (образцы ЛУ-3481, 3489 (Никольско-Лютинское болото, табл. 1) и ЛУ-3183, 3196 (Самбальское болото, табл. 3)). Модель фиксирует загрязнение образцов более молодым или более древним углеродом.

Точность датирования образца и определения значения  $\Delta T$  существенно зависит от скорости торфонакопления. В разрезе Никольско-Лютинского болота торф на глубине 50–250 см накапливался со скоростью 0.83 мм/год, на глубине 250–310 и 470–600 см – 0.28 и 0.30 мм/год соответственно и на глубине 310–470 см – 0.48 мм/год (табл. 1). При указанных темпах накопления торфа 10-сантиметровые слои датированного образца торфа формировались соответственно в течение 120, 357 и 208 кал. л.

Понижение скорости торфонакопления также выявлено в отложениях болота Ширинский мох (0.33 мм/год) на глубине 200–340 см и Самбальского болота (0.29 мм/год) на глубине 517–587 см, формировавшихся 9142–6945 и 7340–3060 календарных лет назад от 1950 года (кал. л. н.) соответственно (табл. 2 и 3). При скорости торфонакопления 0.29 мм/год датируемый слой толщиной 10 см формировался в течение 345 лет и значение  $\Delta T$  данного образца представляет собой сглаженную среднюю величину за столь длительный интервал времени.

Различия амплитуды изменений среднегодовой температуры в значительной мере обусловлены ошибкой определения реконструированной среднегодовой температуры, равной  $\pm 0.6$  °C [1, 11], широтой и долгой нахождения изучаемого разреза, возможными локальными условиями окружающей среды и точностью определения возраста этапов похолоданий и потеплений изученных разрезов.

В рассматриваемых трех разрезах болотных отложений выявлены этапы похолодания в интервалах около 330–120, 614–420, 890–650, 1619–1210, 2820–2410, 4869–4340, 7340–7190, 9397–9085, 11589–10260 кал. л. н. Этапы потепления установлены в интервалах около 1423–920, 2344–1730, 4409–3001, 6768–4964, 8767–7439, 10205–9420 кал. л. н. (табл. 4, рис. 3). Интервалы моделированного возраста этапов похолоданий и потеплений данных разрезов в большинстве случаев согласуются между собой в пределах погрешности 200–250 лет.

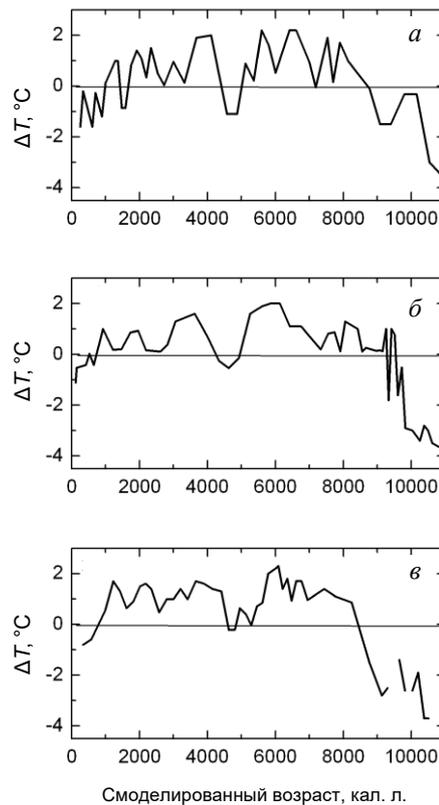


Рис. 3. Реконструкция отклонений среднегодовой температуры от современных значений ( $\Delta T$ ) за период 200–11000 лет по данным анализа отложений болот Никольско-Лютинское (а), Ширинский Мох (б) и Самбальское (в)

На трех изученных разрезах болотных отложений наименьшие значения  $\Delta T$  выявлены в малом ледниковом периоде (МЛП) в интервале около 120–890 кал. л. н. В отложениях Никольско-Лютинского болота фазы похолодания в МЛП определены как  $253 \pm 25$ ,  $614 \pm 21$  и  $890 \pm 12$  кал. л. н., в отложениях Ширинского болота –  $120 \pm 20$ ,  $420 \pm 20$  и  $650 \pm 20$  кал. л. н., а в отложениях Самбальского болота –  $331 \pm 62$  и  $576 \pm 42$  кал. л. н. (табл. 1–4). С учетом приведенных выше источников ошибок датирования указанные фазы похолодания могут быть коррелированы с хорошо установленными минимумами солнечной активности Маундера (1645–1714 гг.), Шпёрера (1416–1534 гг.) и Вольфа (1282–1342 гг.), соответствующими наиболее холодным фазам малого ледникового периода [12]. В фазах похолодания МЛП среднегодовая температура была ниже современной приблизительно на 1.0–1.6 °C (табл. 4). В течение средневекового потепления около 1423–920 кал. л. н. среднегодовая температура превышала современную на 0.13–1.3 °C. В предшествующем этапе похолодания около 1619–1210 кал. л. н. по данным изучения болот Никольско-Лютинское и Ширинский Мох значение  $\Delta T$  понизилось до 0.19...–0.87 °C. В интервале 2344–1730 кал. л. н. среднегодовая температура увеличилась на 0.34–1.4 °C по сравнению с современным значением (Римский период потепления). На рубеже SA/SB периодов около 2800–2400 кал. л. н. значение  $\Delta T$  понизилось до 0...–0.5 °C. При потеплении в суббореальном периоде,

Табл. 4

Хронология этапов похолоданий и потеплений в голоцене на Северо-Западе России по данным анализа отложений болот Никольско-Лютинское, Ширинский Мох и Самбальское и соответствующая хронология по данным содержания космогенных изотопов <sup>14</sup>C и <sup>10</sup>Be. Численные значения смоделированного возраста образцов торфа и отклонений среднегодовой температуры (ΔT) приведены из данных табл. 1-3. Обозначения SA, SB, AT, BO, PB означают субатлантический, суббореальный, атлантический, бореальный, пребореальный периоды голоцена соответственно

Периоды похолоданий и потеплений в голоцене	Никольско-Лютинское		Ширинский Мох		Самбальское		Пределы значения возраста и ΔT, °C		Возраст по космогенным изотопам кал. л. н. (от 2000 г.)
	кал. л. н.	ΔT, °C	кал. л. н.	ΔT, °C	кал. л. н.	ΔT, °C	кал. л. н. (от 1950 г.)	ΔT, °C	
Фазы похолоданий в малом ледниковом периоде	253 ± 25 614 ± 21 890 ± 12	-1.6 -1.6 -1.2	120 ± 20 420 ± 20 650 ± 20	-1.1 -0.42 -0.42	331 ± 62 576 ± 42 —	-0.79 -0.59 —	330-120 614-420 890-650	-0.79...-1.6 -0.42...-1.6 -0.42...-1.2	1619 ± 63
Средневековый этап потепления	1365-992	0.13-0.98	1210-920	0.19-1.0	1423-984	0.55-1.30	1423-920	0.13-1.30	1250-800
Этап похолодания в SA-периоде	1584-1474	-0.87	1470-1210	0.19-0.21	1619 ± 63	0.65	1619-1210	0.19...-0.86	1310 ± 40
Римский период потепления	2339-1744	0.34-1.10	1960-1730	0.87-0.94	2344-1813	0.90-1.40	2344-1730	0.34-1.40	от 2245 ± 35 до 1695 ± 15
Похолодание на рубеже SA/SB-периодов	2723-2536	0.04-0.50	2820-2410	0.12-0.38	2580	0.48	2820-2410	0.04-0.50	от 2750 ± 60 до 2360 ± 40
Этап потепления в SB-периоде	4105-3001	0.96-2.00	4010-3060	0.38-1.60	4409-3209	1.40-1.30	4409-3001	0.96-2.0	4400-2300
Похолодание на рубеже SB/AT-периодов	4869-4582	-1.10	4630	-0.24...-0.54	4815-4533	-0.22...-0.20	4869-4533	-0.22...-1.10	от 4855 ± 45 до 4450 ± 20
Максимальное потепление в AT-периоде	6605-5119	0.89-2.20	6760-5260	1.10-2.0	6768-4964	0.64-1.70	6768-4964	0.64-2.20	4955 ± 15 5170 ± 50 5405 ± 25 5860 ± 25
Фаза похолодания в AT-периоде	7191	0	7340	0.20	—	—	7340-7190	0-0.2	7460 ± 20 7300 ± 25 7195 ± 25
Потепление в начале AT-периода	8767-7529	0-1.87	8430-7560	0.83-1.0	8246-7439	0.87-1.40	8767-7439	1.0-1.87	8710 ± 20 8515 ± 35 8280 ± 20 8120 ± 20
Похолодание на рубеже AT/BO периодов	9397-9085	-1.50	9340	-1.8	9304-9142	-1.50...-2.50	9397-9085	-0.50...-2.50	9500-9000
Потепление в BO-периоде	10164-9792	-0.32	9720-9420	1.0...-0.51	10205-9142	-1.40...-1.90	10205-9420	1.0...-1.9	10150-9700
Похолодание на рубеже BO/PB и в течение PB-периода	11589-10534	-(3.0-3.7)	11160-10260	-3.04...-3.9	10507-10378	-3.70	11589-10260	-3.0...-3.7	10300-10150

в интервале около 4400–3000 кал. л. н.,  $\Delta T$  составило около 1.0–2.0 °С. При похолодании на рубеже SB/AT периодов около 4869–4533 кал. л. н.  $\Delta T$  понизилось до –0.2...–1.1 °С. В атлантическом периоде выделяется два этапа потепления. Максимальное потепление в AT-периоде наступило около 6368–4960 кал. л. н., когда среднегодовая температура была выше современного значения на 0.6–2.2 °С. В атлантическом периоде около 7340–7200 кал. л. н. наблюдалось кратковременное похолодание, и среднегодовая температура понизилась до современного уровня ( $\Delta T$ , 0–0.2 °С). В первой половине AT-периода 8770–7440 кал. л. н.  $\Delta T$  находилось в пределах 1–1.9 °С. При похолодании на рубеже AT/BO периодов около 9400–9085 кал. л. н.  $\Delta T$  уменьшилось до значения –1.5...–2.5 °С. При потеплении в бореальном периоде около 10200–9400 кал. л. н.  $\Delta T$  достигло значения 1.0...–0.3 °С (в окрестностях болот Никольско-Лютинское и Ширинский мох) и –1.4...–1.9 °С (вблизи Самбальского болота). При похолодании на рубеже BO/PB периодов и пребореальном периоде около 11000–10300 кал. л. н. отклонение среднегодовой температуры от современного значения составляло –3.4...–4.5 °С.

Данные, приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что этапы похолоданий и потеплений в пределах вышеуказанных ошибок датирования имели место одновременно в пунктах исследованных болотных отложений, расположенных в северных, центральных и южных районах Северо-Запада России. Синхронность изменений среднегодовой температуры более четко выражена на участках разрезов болотных отложений, формировавшихся со скоростью более 0.4–0.5 мм/год. Менее четко синхронность выражена на участках, где торф накапливался с меньшей скоростью.

**2.2. Корреляция хронологии короткопериодных изменений климата на Северо-Западе России с данными других регионов.** Представляет интерес сопоставить полученные нами результаты реконструкции с данными для других регионов. В.А. Климанов [11], используя разработанный им информационно-статистический метод определения среднегодовой, июльской и январской температур и среднегодовой суммы осадков для многочисленных разрезов озерных и болотных отложений (более 60), построил количественные палеотемпературные кривые для позднеледниковья и голоцена в шкале времени. Изученные им разрезы простираются от Северо-Запада и центральных регионов России до Дальнего Востока. Наиболее заметные экстремумы похолоданий в голоцене были выявлены в 10700, 9200, 7300, 5100, 3300, 2600, 1800, 1400, 1160, 700, 530, 250, 100 кал. л. н. (от 1950 года). Полученные данные, по мнению В.А. Климанова, свидетельствуют, что в гумидной зоне Северной Евразии температурные изменения были одновременными, но имели различную амплитуду. В северных районах амплитуда изменений температуры была большей, чем в южных.

Указанные экстремумы похолоданий в пределах рассмотренных ошибок определения возраста в основном согласуются с установленной нами хронологией этапов похолоданий в голоцене на Северо-Западе России (табл. 4).

Н.А. Хотинский и В.А. Климанов [14] на основе палинологических исследований и реконструкции количественных параметров климата Половецко-Купанского болота установили экстремумы похолоданий в голоцене около 10800 кал. л. н.

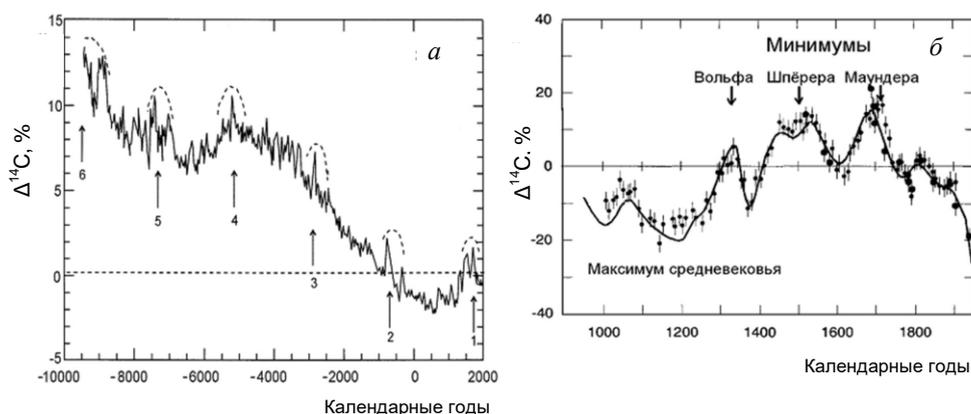


Рис. 4. *а*) Крупномасштабные изменения концентрации радиоуглерода [6], измеренной в блоках колец деревьев известного возраста за последние 11785 лет (стрелки указывают на повторяемость таких изменений), погрешность измерений не превышает нескольких долей процента. *б*) Максимальные значения концентрации  $^{14}\text{C}$  ( $\Delta^{14}\text{C}$ ) [12] последнего тысячелетия, повторяющиеся примерно через 200 лет, соответствуют известным минимумам солнечной активности: Вольфа, Шпёра, Маундера, точками представлены экспериментальные данные

(периславское похолодание), 7300, 5150, 2600, 1400 кал. л. н. и в МЛП, которые синхронны приведенным выше экстремумам похолоданий на территории Северной Евразии.

А.А. Величко с соавторами [13] изучили динамику климата и растительности позднеледниковья и голоцена в широтных зонах от  $68^\circ$  до  $54^\circ$  с. ш. от северо-западных до дальневосточных регионов России. На основе палинологических данных изученных разрезов с применением информационно-статистического метода [4] были определены количественные параметры климата этапов потеплений и фаз похолоданий во всех климатических периодах голоцена, похолоданий между всеми смежными периодами и в малом ледниковом периоде.

Экстремумы фаз похолоданий установлены около 10800, 9140, 7300, 5150, 2700, 1400 кал. л. н. Интервалы потепления определены около 11250 (половецкое потепление), 9500 (оптимум ВО-периода), 9000–7400 (ранний АТ-период), 6850–5700 (климатический оптимум голоцена), 3800 (оптимум SB-периода), 2000, 950 кал. л. н. (средневековый оптимум). Приведенные числовые данные хронологии этапов потеплений и похолоданий в основном согласуются в пределах ошибки датирования с полученными нами данными для Северо-Запада России (см. табл. 4 и рис. 3).

Е.Ю. Новенко с соавторами проследили изменения растительности и климата в голоцене в центральных районах Русской равнины. Наиболее детально ими изучены отложения болота Старосельский мох на юге Валдайской возвышенности и болота Клюква в бассейне р. Оки [15–17]. Для реконструкции палеоклиматов авторы использовали «метод лучших аналогов» [15]. Согласно построенным ими палеотемпературным кривым, в окрестностях болота Старосельский Мох в интервале 10000–9700 кал. л. н. среднегодовая температура ( $t_{\text{год}}$ ) в бореальном периоде увеличилась от  $0^\circ\text{C}$  до  $1^\circ\text{C}$ , затем в интервале 9200–8900 кал. л. н. понизилась до  $0^\circ\text{C}$ . В начале атлантического периода

9900–8700 кал. л. н.  $t_{\text{год}}$  выросла до 1 °С, затем 8500–8100 кал. л. н. понизилась до –0.5 °С. В интервале 8100–7900 кал. л. н.  $t_{\text{год}}$  резко увеличилась до современного значения 4.1 °С. При последующем быстром потеплении 6500–5000 кал. л. н.  $t_{\text{год}}$  повысилась на 2–3 °С выше современного значения (голоценовый термический максимум). Около 4800 кал. л. н. произошло похолодание и  $t_{\text{год}}$  понизилась до современного значения. Суббореальный теплый период 4700–2900 кал. л. н. ( $t_{\text{год}}$  на 1–1.5 °С выше современного значения) прервался короткими фазами похолодания 4200, 3500, 2800 кал. л. н., когда  $t_{\text{год}}$  понизилась до современного значения.

В субатлантическом периоде 2500–1600 кал. л. н.  $t_{\text{год}}$  возросла на 0.5–1 °С [17]. Около 1400 кал. л. н.  $t_{\text{год}}$  опустилась на 1 °С. Путем анализа соотношений основных компонентов в спорово-пыльцевых спектрах данного разреза был четко выделен средневековый климатический оптимум в интервале 1200–800 кал. л. н., характеризующийся увеличением  $t_{\text{год}}$  на 1.5 °С выше современного значения. В МЛП в интервале 650–400 кал. л. н.  $t_{\text{год}}$  уменьшилась на 2.0 °С [15].

Сравнение палеоклиматических кривых для отложений болот Старосельский мох и Клюква показывает синхронность рассмотренных изменений климата [16].

Перечисленные выше фазы похолодания 10000, 9200–8900, 8100–7900, 4800, 4200, 3500, 2800, 1400, 650–400 кал. л. н. в большинстве случаев в пределах ошибки определения возраста сопоставимы с численными показателями фаз похолоданий на Северо-Западе России, приведенными в табл. 4. Этапы потеплений в бореальном (9800–9300 кал. л. н.), раннеатлантическом (8900–7500 кал. л. н.), позднеатлантическом (7000–5000 кал. л. н.), суббореальном (4700–2900 кал. л. н.), раннесубатлантическом (1200–800 кал. л. н.) периодах также согласуются с этапами потеплений на Северо-Западе России (табл. 4). В то же время в изученных двух разрезах амплитуды изменений  $t_{\text{год}}$  в бореальном и раннеатлантическом этапах заметно различаются с данными для северо-западного региона (табл. 4).

Среди работ, посвященных реконструкции количественных параметров климата в голоцене, внимания также заслуживают исследования, выполненные в Финляндии, Швеции, Эстонии и Латвии. В Финляндии были изучены отложения озера Лайхаламни на юге страны, в южной Швеции – озера Фларкен, в Эстонии – озера Райгаствере, в Латвии – озера Каряновос [18–21].

По данным реконструкции параметров климата в изученных пунктах в бореальном периоде среднегодовая температура увеличилась и около 9000–8600 кал. л. н. достигла современного значения. В интервале 8600–8100 кал. л. н. произошло похолодание и  $t_{\text{год}}$  уменьшилась на от 0.5 °С [18] до 1.5 °С [19–21]. Авторы реконструкции [19, 21] данное похолодание коррелируют с известным этапом похолодания – «событием 8200 кал. л. н.» – переносом около 8500 кал. л. н. в Атлантический океан холодных ледниковых вод из подпруженных озер Лаврентийского ледникового щита, что ослабило атлантическую меридиональную круговоротную циркуляцию и вызвало похолодание в Северной Америке и Северной Европе [22].

Такой же механизм притока холодных вод от тающих ледников и ослабления термохалинной циркуляции в Атлантическом океане, по мнению авторов обзорной статьи [23], объясняет холодный климат в раннем голоцене в Северной

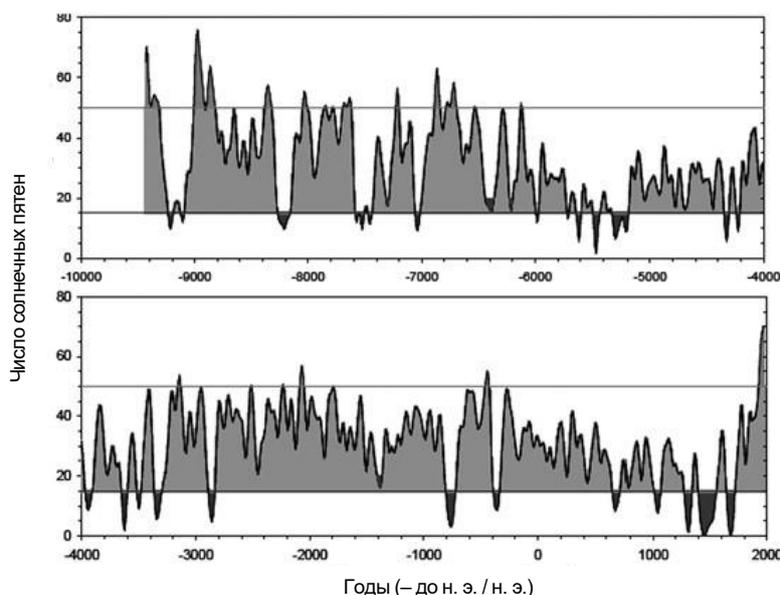


Рис. 5. Сглаженные по десятилетиям значения чисел солнечных пятен в течение голоцена. Наибольшие выбросы по времени соответствуют главным минимальным или максимальным числам солнечных пятен [40]

Америке и Северной Европе, хотя летняя инсоляция в этот период была высокой. Отметим, что 11000–10300 кал. л. н. солнечная активность также была высокой (рис. 5).

Начиная с 8100 кал. л. н. температура  $t_{\text{год}}$  быстро растет, и в течение 8000–4500 кал. л. н. наблюдается наиболее теплая фаза атлантического периода – климатический оптимум голоцена. В Финляндии среднегодовая температура достигла максимального значения в интервале 8000–5800 кал. л. н., на 1.5–2 °С превысив современное значение [18]. В течение 7000–6700 кал. л. н. отмечена фаза похолодания. В юго-восточных районах Эстонии и Латвии в течение 8000–4500 кал. л. н. максимальная  $t_{\text{год}}$  была на 2.5–3 °С выше современного значения [19, 21]. По данным [18–21], начиная с 4500–4300 кал. л. н. до настоящего времени среднегодовая температура постепенно понизилась на 1.5 °С. Приведенные в указанных работах сглаженные палеотемпературные кривые после 4500 кал. л. н. не отражают известные похолодания около 2800–2700 кал. л. н. и малого ледникового периода, а также римского и средневекового этапов потепления. М. Хейккила и Х. Сеппа [18] отмечают, что используемая ими модель «глубина – возраст» не позволяет точно установить короткопериодные события в климатических реконструкциях Северной Европы, поэтому необходимо создать другую высокоразрешающую реконструкцию температуры. Предложенные авторами реконструкции основаны на малом количестве (6–13) радиоуглеродных датировок, что затрудняет корректное датирование короткопериодных изменений климатических событий.

Для определения периодов похолодания в среднем и позднем голоцене Н. Ваннер с соавторами [24] проанализировали данные изменения температуры 46 разрезов голоценовых морских, озерных, болотных отложений и пещерных

сталагмитов, расположенных в основном в Северном полушарии. На основе этих данных периоды похолодания были выявлены в следующих интервалах времени: 8600–8000, 6500–5900, 4800–4500, 3300–2500, 1750–1350 кал. л. н. и 1250–1850 гг. Авторы отмечают, что периоды низкой температуры часто совпадают с периодами низкой солнечной активности, но при этом важную роль в короткопериодных изменениях климата могут играть такие процессы, как взрывные извержения тропических вулканов, флуктуации термохалинной циркуляции в Атлантическом океане, изменения интенсивности муссонной системы в Афро-Тихоокеанском регионе и течений в Арктическом бассейне, антропогенные изменения, особенно в XX – XXI вв.

Представленные в табл. 1–4 данные свидетельствуют в основном, с учетом рассмотренных ошибок датирования, о синхронности хронологии этапов похолоданий и потеплений. На трех изученных разрезах болотных отложений на Северо-Западе России наибольшая согласованность хронологии короткопериодных вариаций наблюдается для интервалов, характеризующихся высокой скоростью торфонакопления (около 0.5–1 мм/год). К таковым относится большая часть интервалов изученных разрезов.

Применение методологии высокочастотного датирования и моделирования позволило выявить и продатировать три основные фазы похолодания в малом ледниковом периоде. Установленные в голоцене на Северо-Западе России численные значения короткопериодных этапов похолоданий с учетом отмеченных ошибок датирования в большинстве случаев согласуются с хронологией этапов похолоданий, приведенных в рассмотренных выше работах [11, 13–17, 24], а также с реконструкцией температуры окружающей среды на основе анализа изотопного состава кислорода в кернах льда из Гренландии [24, 38].

**2.3. Корреляция этапов похолоданий и периодов наступлений горных ледников.** Наступления и отступления горных ледников тесно связаны с изменениями температуры воздуха и количества атмосферных осадков. На высоких и средних широтах этапы наступления ледников коррелируют с многодекадными периодами уменьшения летней температуры [23].

Динамика горных ледников наиболее детально изучена в Швейцарских Альпах. Здесь самые крупные ледники Грейт Алетч (Great Aletch), Горнер (Gorner) и Ловер Гринделвалд (Lower Grindelwald) наступали синхронно в течение 3000–2600 гг. до н. э., 500–600 гг., 800–900 гг., 1100–1200 гг. и в МЛП в течение 1300–1385, 1600–1667, и 1820–1860 гг. [26]. По данным Ваннера с соавторами [23], в нескольких частях света горные ледники двигались более или менее одновременно около 5400–4800, 3800, 3100 и 2500 кал. л. н. За последние 2000 лет оледенения происходили в 600, 1050–1150 гг. и 2–3 крупных наступления ледников пришлось на МЛП между 1300 и 1850 гг. В Альпах, Аляске и Скалистых горах ледники достигли максимума в 1300, 1450, 1650, и 1850 гг., которые в целом синхронны с периодами минимума солнечной активности Вольфа, Шпёрера, Маундера и Дальтона соответственно [23]. Близкая хронология наступления ледников установлена и для ледников на Алтае, где большое число обломков древесных стволов были погребены ледниками, наступившими в интервале 1200–1800 гг. Датировки стволов деревьев, установленные дендрохронологическими методами,

соответствуют интервалам 1250–1260, 1320–1380, 1440–1510 и 1640–1740 гг. [25, 27]. Приведенные интервалы наступлений ледников хорошо согласуются с хронологией перечисленных минимумов солнечной активности.

Авторы работы [26] провели сравнение флуктуаций вышеупомянутого ледника Грейт Алетч с вариациями концентрации  $^{14}\text{C}$  в атмосфере за последние 3500 лет и выявили тесную корреляцию между указанными параметрами: периодам максимального распространения ледников соответствовали максимальные значения концентрации  $^{14}\text{C}$  и, наоборот, минимальному распространению ледников соответствовали минимальные значения концентрации  $^{14}\text{C}$ . Наличие такой закономерности, по мнению указанных авторов, поддерживает гипотезу о том, что вариации солнечной активности являются основным фактором формирования климата в западной части Центральной Европы в позднем голоцене. Указанные авторы также установили корреляцию между периодами наступления ледника Грейт Алетч и периодами высокого уровня 20 озер на Швейцарском плато, горах Юра и предгорьях Альп на севере Франции. Согласно полученным результатам, более высокие уровни озер наблюдались в течение 800–400 гг. до н. э., 650–850, 1050–1250 и 1300–1860 гг. [26]. Последний этап высокого уровня озер состоит из трех фаз, которые в целом синхронны этапам наступления ледников в периоды минимумов солнечной активности Вольфа и Маундера.

М. Магни [28] исследовал динамику изменения уровня 26 горных озер в Швейцарии и Франции в течение голоцена и сравнил полученные данные по изменению уровня озер с изменениями концентрации  $^{14}\text{C}$  в атмосфере ( $\Delta^{14}\text{C}$ ), коррелируемые с изменением солнечной активности за данный период. Сравнение показывает, что периоды низкой солнечной активности, соответствующие высоким значениям  $^{14}\text{C}$ , наблюдались в периоды высокого уровня озер, в то время как низкие уровни озер имели место в периоды высокой солнечной активности (низкого значения  $\Delta^{14}\text{C}$ ).

Сопоставление приведенных числовых данных хронологии продвижения крупных горных ледников в ряде пунктов Северного полушария с цифровыми данными хронологии этапов похолоданий в голоцене на Северо-Западе России (табл. 4), с учетом ошибки датирования, в целом свидетельствует о синхронности этапов наступания горных ледников и этапов похолодания на данной территории. Синхронность указанных событий предусматривает единый внешний формирующий фактор, вызвавший эти события, каким может быть уменьшение общего солнечного излучения и солнечной активности.

В изученных трех разрезах болотных отложений на Северо-Западе России фазы похолоданий в МЛП определены 330–120, 614–420 и 890–650 кал. л. н. (табл. 4). В пределах ошибки датирования они могут быть коррелируемы с минимумами солнечной активности Маундера (1645–1714 гг.), Шпёрера (1416–1534 гг.) и Вольфа (1282–1342 гг.), соответствующими наиболее холодным фазам МЛП [12]. В более ранние периоды этапы похолодания выявлены 1584–1210, 2820–2410 и 4869–4340 кал. л. н. (табл. 4).

Наиболее крупные ледники в Швейцарских Альпах наступали синхронно 5000–4600, 3000–2600, 1450–1350, 1150–1050, 850–750, 650–565, 350–283, 130–90 кал. л. н. (от 1950 г.) [26]. В Альпах, Аляске и Скалистых горах ледники достигали максимума в 1300, 1450, 1650 и 1850 гг. [23]. Сравнение цифровых значе-

ний этапов похолодания на Северо-Западе России и периодов наступания горных ледников в целом показывает синхронность этих этапов.

### 3. Корреляция короткопериодных изменений климата в голоцене и изменений солнечной активности

**3.1. Корреляция изменений солнечной активности и содержания космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  в атмосфере и природных архивах.** Регулярные наблюдения солнечной активности, количественно выраженной числами пятен на Солнце (числа Вольфа), проводятся начиная со времени изобретения телескопа (1610 г.). Детальные исследования изменения параметров общего солнечного излучения, солнечной активности, солнечного магнитного поля, интенсивности галактических космических лучей, скорости образования космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  показывают тесную связь между исследуемыми параметрами. Например, изменения скорости образования  $^{10}\text{Be}$  в течение трех 11-летних солнечных циклов (1975–2010 гг.) показали прямо пропорциональную зависимость между общим солнечным излучением, солнечной активностью и солнечным магнитным полем и обратно пропорциональную зависимость перечисленных параметров с интенсивностью галактических космических лучей и скоростью образования изотопа  $^{10}\text{Be}$  [29].

Результаты исследований изменений перечисленных параметров за последние 400 лет, охватывающие период инструментальных определений чисел солнечных пятен, приведены на рис. 6, из которого следует, что при увеличении общего солнечного излучения синхронно повышается солнечная активность и усиливается экранирующее воздействие магнитного поля Солнца, что приводит к уменьшению потока галактических космических лучей и скорости образования космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$ . Наоборот, при сокращении интенсивности солнечного излучения, солнечной активности и магнитного поля Солнца увеличивается скорость образования космогенных изотопов.

Космогенные изотопы  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  образуются в верхних слоях атмосферы при взаимодействии ядер галактических космических лучей с атомами атмосферных газов. Радиоуглерод вскоре после образования окисляется до  $\text{CO}_2$  и в течение менее 10 лет перемешивается с  $\text{CO}_2$  атмосферы и карбонатами, растворенными в поверхностной воде (75 м) океанов, содержащих в сумме около 1360 млрд т углерода [31].  $\text{CO}_2$  путем фотосинтеза и биологического усвоения ассимилируется растениями и живыми организмами. Измерение концентрации  $^{14}\text{C}$  в однолетних годовых кольцах деревьев, отобранных из многих пунктов в Северном полушарии, показало одинаковую (в пределах ошибки 0.5%) концентрацию  $^{14}\text{C}$ . После образования в атмосфере  $^{10}\text{Be}$  адсорбируется на аэрозолях, после чего в составе атмосферных осадков выпадает на поверхность Земли, в том числе в ледники и морские осадки.

Реконструкции солнечной активности, основанные на измерении концентрации  $^{10}\text{Be}$  в керне льда GRIP из Гренландии и на измерении концентрации  $^{14}\text{C}$  в годовых кольцах деревьев, показали одинаковые синхронные изменения минимумов и максимумов солнечной активности [23, 32, 33] (рис. 7), что свидетельствует

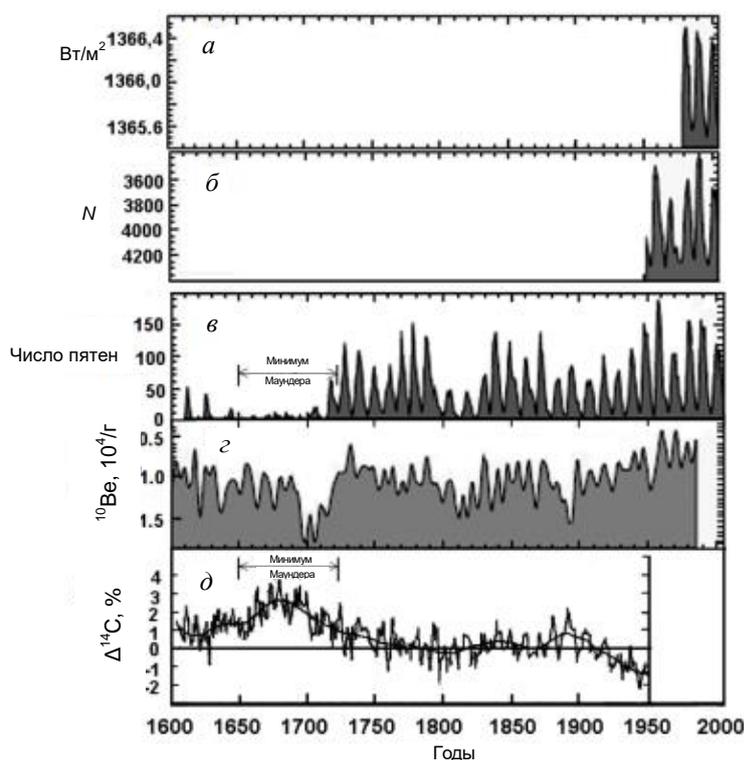


Рис. 6. Изменение солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup> (а); потока нейтронов космических лучей  $N$ , число импульсов в минуту, (б); числа солнечных пятен (в); концентрации  $^{10}\text{Be}$ ,  $10^4/\text{г}$ , (г) [29]; концентрации радиоуглерода  $\Delta^{14}\text{C}$ , %, (д) [30]. Минимум Маундера – существенное понижение солнечной активности [30]

о единой причине, вызвавшей синхронные изменения концентрации космогенных изотопов. Измеренные значения концентрации  $^{14}\text{C}$  относятся к точно установленному календарному возрасту древесных колец. Ввиду этого реконструкция солнечной активности за пределами инструментальных измерений чисел солнечных пятен с использованием космогенных изотопов, по мнению большинства исследователей, является одним из основных методов реконструкции солнечной активности [23, 29, 34].

Путем измерения активности  $^{14}\text{C}$  в образцах древесных колец известного возраста получены данные по изменению концентрации  $^{14}\text{C}$  на временной шкале, покрывающей последние почти 12 тысяч лет [6, 12] (рис. 4, а). Долговременные (тысячи лет) и короткопериодные (сотни лет) флуктуации относительной концентрации  $^{14}\text{C}$  ( $\Delta^{14}\text{C}$ ) в кольцах деревьев надёжно выделяются в этих данных.

На рис. 4, а обращают на себя внимание интервалы повышенных амплитуд концентрации  $^{14}\text{C}$ , которые имели место примерно 9500, 7200, 5400, 2700, 500 л. н., то есть повторялись примерно через 2400 лет. В последнем тысячелетии максимальные значения  $\Delta^{14}\text{C}$  повторялись примерно через 200 лет и соответствовали минимумам солнечной активности Маундера, Шпёрера и Вольфа (рис. 4, б). Приведенные данные свидетельствуют, что наблюдается пропорциональная зависимость между солнечной активностью и концентрацией  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  в природных архивах.

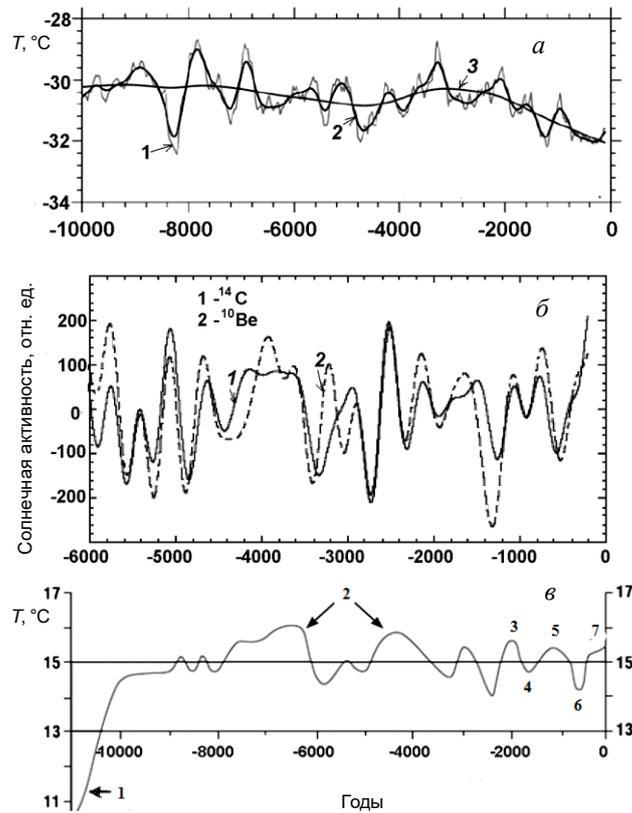


Рис. 7. *а*) Реконструкция температуры воздуха на интервале голоцена, основанная на данных концентрации изотопа кислорода  $^{18}\text{O}$  из ядра льда GISP 2 в Гренландии [38]: 1 – оригинальные данные [38], 2 – сглаженные данные с использованием полосового фильтра с окном 500 лет [24], 3 – сглаженные (отфильтрованные) данные с использованием полосового фильтра с окном 3000 лет [24]. *б*) Реконструкция солнечной активности за последние 6000 лет, основанная на данных скорости образования  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  в природных архивах [23]. Скорость образования  $^{14}\text{C}$  была рассчитана из данных содержания  $^{14}\text{C}$  в годичных кольцах деревьев с учетом динамики круговорота углерода в океане [33]. Скорость образования  $^{10}\text{Be}$  получена из данных измерений содержания  $^{10}\text{Be}$  в ядре льда GRIP в Гренландии [32]. Обе кривые были сглажены (отфильтрованы) с применением полосового фильтра с окном 300–3000 лет. *в*) Периоды похолодания и потепления в Северном полушарии в эпоху голоцена (последние 11 тыс. лет): 1 – конец последней ледниковой эпохи; 2 – климатический оптимум голоцена; 3 – римский климатический оптимум; 4 – эпизод миграции населения; 5 – средневековый теплый период; 6 – «малый ледниковый период»; 7 – период современного потепления [39]

**3.2. Корреляция изменений космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  в природных архивах и короткопериодных изменений климата.** Из исторических хроник и изучения изменений климатических характеристик установлены два периода экстремального изменения климата и солнечной активности в течение прошедшего тысячелетия: малый ледниковый период (~1300–1850 гг.) и теплый средневековый период (~900 – ~1300 гг.), имеющие глобальное проявление [35].

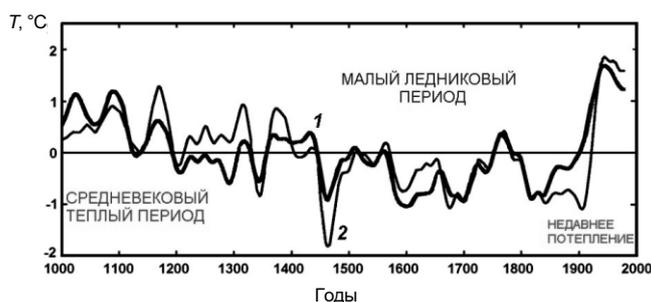


Рис. 8. Временной ход крупномасштабных температурных реконструкций за период 1000–1979 гг.: жирная кривая 1 – среднее арифметическое пяти реконструкций после сглаживания [37]; тонкая кривая 2 – реконструкция температуры северного полушария [36]

На рис. 8 приведены реконструкции температуры воздуха Северного полушария за последние 1000 лет [36] и глобальной температуры за тот же период [37]. Наблюдается синхронность изменений температуры в обеих реконструкциях, но амплитуды температуры часто существенно отличаются. Временной ход изменений температуры четко демонстрирует низкие температуры в течение минимумов солнечной активности Маундера (1645–1714 гг.), Шпёрера (1416–1534 гг.) и Вольфа (1282–1342 гг.) и более высокую температуру воздуха в течение средневекового теплого периода (800–1200 гг.), соответствующего более высокой солнечной активности (рис. 8).

На рис. 7 представлены реконструкции температуры воздуха, основанные на анализе изотопного состава кислорода в керне льда из Гренландии GISP-2 за последние 10 тыс. лет [24, 38] и реконструкции солнечной активности за последние 6000 лет, основанные на скорости образования  $^{10}\text{Be}$  из данных содержания  $^{10}\text{Be}$  в керне льда из Гренландии GRIP [23, 32] и содержания  $^{14}\text{C}$  в годичных кольцах деревьев известного возраста [7] с учетом динамики циркуляции углерода в океане [23, 33]. Из рис. 7, а также из Fig. 1 [24] следует, что в голоцене низкие температуры выявлены около 700–250, 1580–1100, 3000–2600, 4000–3800, 4900–4400, 6700–6300, 7300–7100, 8500–8100 кал. л. н., установлены этапы потепления: 1100–800, 2300–1900, 3500–3100, 4300–4150, 5300–5000, 5800–5600, 7000–6800, 7900–7500, 9200–8700 кал. л. н. По данным изучения содержания  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  в вышеназванных природных архивах низкие значения солнечной активности за последние 6000 лет выявлены около 700–250, 1400–1150, 2800–2650, 4500–4300, 5000–4750, 5650–5400 кал. л. н. Этапы высокой солнечной активности определены около 150–0, 1150–700, 1800–1400, 2200–2000, 2650–2450, 3050–2850, 4300–3500, 4750–4550, 5150–4950, 6000–5650 кал. л. н. (рис. 7, б). Экстремумы главных (grand) минимумов солнечной активности на данном рисунке установлены около 500, 1320–1260, 2300, 2700, 3350, 4450, 4880, 5230, 5580 кал. л. н. Эти численные показатели являются практически идентичными центрам главных минимумов солнечной активности, приведенных в табл. 5 и на рис. 5. Таким образом, сравнительный анализ цифровой хронологии фаз похолоданий и экстремумов главных минимумов солнечной активности по данным изучения ледниковых кернов Гренландии в целом свидетельствует о синхронной корреляции изменений температуры окружающей среды и солнечной активности.

Табл. 5

Центры главных (grand) минимумов солнечной активности в голоцене и их продолжительность

Центр минимума, годы (– до н. э./н. э.)	Продолжительность, лет	Ссылки
1680	80	Минимум Маундера
1470	160	Минимум Шпёрера
1310	80	Минимум Вольфа
1030	80	Минимум Оорта
690	80	[40, 41]
–360	80	[40, 41]
–750	120	[40, 41]
–1385	70	[40, 41]
–2450	40	[41]
–2855	90	[40, 41]
–3325	90	[40, 41]
–3495	50	[40, 41]
–3620	50	[40, 41]
–4220	30	[40, 41]
–4315	50	[40, 41]
–5195	50	[41]
–5300	50	[40, 41]
–5460	40	[40, 41]
–5610	40	[40, 41]
–6385	130	[40, 41]

Табл. 6

Центры главных максимумов солнечной активности в голоцене и их продолжительность

Центр максимума, годы (– до н. э./н. э.)	Продолжительность, лет	Ссылки
1970	30 ± 40	80
505	1495 ± 25	50
305	1695 ± 15	30
–245	2245 ± 35	70
–435	2435 ± 25	50
–2065	4065 ± 75	50
–2955	4955 ± 15	30
–3170	5170 ± 50	100
–3405	5405 ± 25	50
–3860	5860 ± 25	50
–6120	8120 ± 20	40
–6280	8280 ± 20	40
–6515	8515 ± 35	70
–6710	8710 ± 20	40

На рис. 5 показано изменение солнечной активности в течение голоцена, установленное в работе [40] по данным содержания радиоуглерода в образцах известного возраста, а в табл. 5 и 6 указана продолжительность эпизодов высоких и низких состояний солнечной активности по данным содержания  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$ .

Таким образом, приуроченность этапов наступания горных ледников в МЛП к временным интервалам минимальной солнечной активности Маундера, Шпё-рера и Вольфа, являющимся наиболее холодными фазами похолодания в последнем тысячелетии [36, 37]; приуроченность известного крупного (grand) минимума солнечной активности около 2700 кал. л. н. к этапу похолодания между субатлантическим и суббореальным периодами [23] свидетельствуют о тесной взаимосвязи между изменениями солнечной активности и короткопериодными изменениями температуры окружающей среды. Такой точки зрения придерживаются многие исследователи [23, 25, 29, 42, 43]. Примененная в настоящей работе методология высокочастотного датирования и последующего моделирования позволила установить хронологию короткопериодных изменений температуры воздуха и сопоставить короткопериодные интервалы похолоданий в голоцене на Северо-Западе России, приведенные в табл. 4, с хронологией минимумов солнечной активности, установленной на основе определения содержания космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$  в древесных кольцах известного возраста и  $^{10}\text{Be}$  в полярных ледниках, приведенных в табл. 5 и 6 и рис. 5. Из данных табл. 4 следует, что в пределах погрешности датирования, возникающей из-за статистической ошибки определения возраста, наличия в образце примесей более молодого или древнего углерода или малой скорости осадконакопления, в большинстве случаев наблюдается корреляция хронологии фаз похолодания и близких по возрасту минимумов солнечной активности на всем протяжении голоцена, но наиболее четкая корреляция наблюдается за последние несколько тысяч лет.

Для дальнейшего увеличения точности датирования короткопериодных изменений климата и сопоставления хронологии изменений климата и солнечной активности необходимо увеличить частоту датирования и палинологических исследований изучаемых разрезов озерно-болотных отложений.

### Заключение

С помощью методологии моделирования, предложенной К. Бронком Рамсеем, был определен скорректированный возраст образцов, отобранных из отложений верховых болот Северо-Запада России, и установлена уточненная хронология короткопериодных изменений климата в голоцене в пределах изученной территории. Из данных, приведенных в табл. 1–4, следует, что в пределах ошибки определения возраста и среднегодовой температуры короткопериодные этапы изменений среднегодовой температуры происходили в основном синхронно на трех изученных разрезах болотных отложений. Изменения среднегодовой температуры в исследованных пунктах также были в основном синхронны с хронологией изменений температуры в Северном полушарии за последние 1000 лет (рис. 8) и с хронологией, установленной на основе изучения керна полярного льда GISP-2 (рис. 7), а также с хронологией наступаний горных ледников [23, 25, 26]. Сопоставление хронологии этапов похолоданий и потеплений в голоцене на Северо-Западе РФ (табл. 4) и хронологии соответствующих этапов низкой и высокой солнечной активности (табл. 5, 6, рис. 5, 7) в целом демонстрирует синхронность этапов похолоданий с этапами низкой солнечной активности, этапов потеплений с этапами высокой солнечной активности. Показательным примером служит синхронность этапов похолоданий в периоды минимальной солнечной активности Маундера,

Шпёра, Вольфа и Оорта в последнем тысячелетии и в более ранние периоды 1300–1200, 2800–2300, 4850–4450, 7400–7200, 9600–9000 кал. л. н. (рис. 5, 7, табл. 5). Установленная синхронность короткопериодных изменений климата и солнечной активности свидетельствует о том, что изменения солнечной активности являются одной из основных натуральных причин короткопериодных изменений климата в голоцене. Это заключение является дополнительным подтверждением сделанных ранее выводов о важной роли солнечной активности в короткопериодных изменениях климата в голоцене [23, 25, 29, 42, 43].

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00381).

### Литература

1. *Arslanov Kh.A., Savelyeva L.A., Gey N.A., Klimanov V.A., Chernov S.B., Chernova G.M., Kuzmin G.F., Tertychnaya T.V., Subetto D.A., Denisikov V.P.* Chronology of vegetation and paleoclimatic stages of northwestern Russia during the Late Glacial and Holocene // *Radiocarbon*. – 1999. – V. 41, No. 1. – P. 25–45. – doi: 10.1017/S0033822200019317.
2. *Arslanov Kh.A., Savelieva L.A., Klimanov V.A., Chernov S.B., Maksimov F.E., Tertychnaya T.V., Subetto D.A.* New data on chronology of landscape-paleoclimatic stages in northwestern Russia during the Late Glacial and Holocene // *Radiocarbon*. – 2001. – V. 43, No 2B. – P. 581–594. – doi: 10.1017/S0033822200041230.
3. *Чернова Г.М., Арсланов Х.А., Денисенков В.П., Севастьянов Д.В., Тертычная Т.В., Окунева Е.Ю., Чернов С.Б.* Палеоэкология и биоразнообразие растительности Северо-Западного Приладожья в голоцене // *Вестн. С.-Петерб. ун-та, Сер. 7.* – 1997. – Вып. 4. – С. 131–137.
4. *Климанов В.А.* К методике количественного восстановления климата прошлого // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. географ.* – 1976. – № 2. – С. 92–98.
5. *Елина Г.А., Арсланов Х.А., Климанов В.А.* Этапы развития растительности голоцена в южной и восточной Карелии // *Бот. журн.* – 1996. – Т. 81, № 3. – С. 1–17.
6. *Stuiver M., Reimer P.J., Bard E., Beck J.W., Burr G.S., Hughen K.A., Kromer B., McCormac G., van der Plicht J., Spurk M.* INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. // *Radiocarbon*. – 1998. – V. 40, No 3. – P. 1041–1083. – doi: 10.1017/S0033822200019123.
7. *Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J.* IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP // *Radiocarbon*. – 2013. – V. 55, No 4. – P. 1869–1887. – doi: 10.2458/azu\_js\_rc.55.16947.
8. *Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Burr G.S., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., McCormac F.G., Manning S.W., Reimer R.W., Richards D.A., Southon J.R., Talamo S., Turney C.S.M., van der Plicht J., Weyhenmeyer C.E.* IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. // *Radiocarbon*. – 2009. – V. 51, No 4. – P. 1111–1150. – doi: 10.1017/S0033822200034202.
9. *Bronk Ramsey C.* Deposition models for chronological records // *Quat. Sci. Rev.* – 2008. – V. 27, No 1–2. – P. 42–60. – doi: 10.1016/j.quascirev.2007.01.019.

10. *Bronk Ramsey C.* Methods for summarizing radiocarbon datasets // *Radiocarbon*. – 2017. – V. 59, No 6. – P. 1809–1833. – doi: 10.1017/RDC.2017.108.
11. *Климанов В.А.* Климат Северной Евразии в позднеледниковье (в последний климатический ритм) // *Короткопериодные и резкие ландшафтно-климатические изменения за последние 15000 лет.* – М.: Ин-т географии РАН, 1994. – С. 61–93.
12. *Stuiver M., Quay P.D.* Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun // *Science*. – 1980. – V. 207, No 4426. – P. 11–19. – doi: 10.1126/science.207.4426.11.
13. *Velichko A.A., Andreev A.A., Klimanov V.A.* Climate and vegetation dynamics in the tundra and forest zone during the Late Glacial and Holocene // *Quat. Int.* – 1997. – V. 41–42. – P. 71–96. – doi: 10.1016/S1040-6182(96)00039-0.
14. *Khotinsky N.A., Klimanov V.A.* Alleröd, Younger Dryas and Early Holocene palaeo-environmental stratigraphy // *Quat. Int.* – 1997. – V. 41–42, P. 67–70. – doi: 10.1016/S1040-6182(96)00038-9.
15. *Новенко Е.Ю., Зюганова И.С., Ольчев А.В.* Применение метода палеоаналогов для прогноза динамики растительности при изменениях климата // *Докл. Акад. наук.* – 2014. – Т. 457, № 1. – С. 117–121.
16. *Novenko E.Yu., Olchev A.V.* Early Holocene vegetation and climate dynamics in the central part of the East European Plain (Russia) // *Quat. Int.* – 2015. – V. 388. – P. 12–22. – doi: 10.1016/j.quaint.2015.01.027.
17. *Novenko E.Yu., Tsyganov A.N., Pisarchuk N.M., Volkova E.M., Babeshko K.V., Kozlov D.N., Shilov P.M., Payne R.J., Mazei Yu.A., Olchev A.V.* Forest history, peatland development and mid- to late Holocene environmental change in the southern taiga forest of central European Russia // *Quat. Res.* – 2018. – V. 89, No 1. – P. 223–236. doi: 10.1017/qua.2017.91.
18. *Heikkilä M., Seppä H.* An 11,000 yr palaeotemperature reconstruction from the southern boreal zone in Finland // *Quat. Sci. Rev.* – 2003. – V. 22, No 5–7. – P. 541–554. – doi: 10.1016/S0277-3791(02)00189-0.
19. *Seppä H., Poska A.* Holocene annual mean temperature changes in Estonia and their relationship to solar insolation and atmospheric circulation patterns // *Quat. Res.* – 2004. – V. 61, No 1. – P. 22–31. – doi: 10.1016/j.yqres.2003.08.005.
20. *Seppä H., Hammarlund D., Antonsson K.* Low-frequency and high-frequency changes in temperature and effective humidity during the Holocene in south-central Sweden: Implications for atmospheric and oceanic forcings of climate // *Clim. Dyn.* – 2005. – V. 25, No 2–3. – P. 285–297. – doi: 10.1007/s00382-005-0024-5.
21. *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, No 4. – P. 705–719. – doi: 10.1111/j.1502-3885.2010.00164.x.
22. *Alley R.B., Ágústsdóttir A.M.* The 8k event: Cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change // *Quat. Sci. Rev.* – 2005. – V. 24, No 10–11. – P. 1123–1149. – doi: 10.1016/j.quascirev.2004.12.004.
23. *Wanner H., Beer J., Bütikofer J., Crowley T.J., Cubasch U., Flückiger J., Goosse H., Grosjean M., Joos F., Kaplan J.O., Küttel M., Müller S.A., Prentice I.C., Solomina O., Stocker T.F., Tarasov P., Wagner M., Widmann M.* Mid-to Late Holocene climate change: An overview // *Quat. Sci. Rev.* – 2008. – V. 27, No 19–20. – P. 1791–1828. – doi: 10.1016/j.quascirev.2008.06.013.
24. *Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S.P., Jetel M.* Structure and origin of Holocene cold events // *Quat. Sci. Rev.* – 2011. – V. 30, No 21–22. – P. 3109–3123. – doi: 10.1016/j.quascirev.2011.07.010.
25. *Solomina O.N., Bradley R.S., Jomelli V., Geirsdottir A., Kaufman D.S., Koch J., McKay N.P., Masiokas M., Miller G., Nesje A., Nicolussi K., Owen L.A., Putnam A.E., Wanner H.,*

- Wiles G., Yang B. Glacier fluctuations during the past 2000 years // *Quat. Sci. Rev.* – 2016. – V. 149. – P. 61–90. – doi: 10.1016/j.quascirev.2016.04.008.
26. Holzhauser H., Magny M., Zumbühl H.J. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years // *Holocene*. – 2005. – V. 15, No 6. – P. 789–801. – doi: 10.1191/0959683605hl853ra.
27. Agatova A.R., Nazarov A.N., Nepop R.K., Rodnight H. Holocene glacier fluctuations and climate changes in the southeastern part of the Russian Altai (South Siberia) based on a radiocarbon chronology // *Quat. Sci. Rev.* – 2012. – V. 43. – P. 74–93. – doi: 10.1016/j.quascirev.2012.04.012.
28. Magny M. Holocene fluctuations of lake levels in west-central Europe: Methods of reconstruction, regional pattern, palaeoclimatic significance and forcing factors // *Encyclopedia of Quaternary Science* / Ed. by S.A. Elias. – Amsterdam: Elsevier, 2006 – V. 2. – P. 1389–1399.
29. Gray L.J., Beer J., Geller M., Haigh J.D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G.A., Shindell D., van Geel B., White W. Solar influences on climate // *Rev. Geophys.* – 2010. – V. 48, No 4. – Art. 2009RG000282, P. 1–53. – doi: 10.1029/2009RG000282.
30. Attolini M.R., Cecchini S., Galli M., Kocharov G.E., Nanni T. 400 year record of  $\Delta^{14}\text{C}$  in tree rings: The solar-activity cycle before, during and after maunder minimum and the longer cycles // *Il Nuovo Cimento C*. – 1993. – V. 16 C, No 4. – P. 419–436. – doi: 10.1007/BF02507651.
31. Арсланов Х.А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология / Отв. ред. Ю.А. Щуколюков. – Л.: Из-во Ленингр. ун-та, 1987. – 300 с.
32. Vonmoos M., Beer J., Muscheler R. Large variations in Holocene solar activity: Constraints from  $^{10}\text{Be}$  in the Greenland Ice Core Project ice core // *J. Geophys. Res.* – 2006. – V. 111, No A10. – Art. A10105, P. 1–14. – doi: 10.1029/2005JA011500.
33. Müller S.A., Joos F., Edwards N.R., Stocker T.F. Water mass distribution and ventilation time scales in a cost-efficient, three-dimensional ocean model // *J. Clim.* – 2006. – V. 19, No 21. – P. 5479–5499. – doi: 10.1175/JCLI3911.1.
34. Steinhilber F., Beer J., Fröhlich C. Total solar irradiance during the Holocene // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – V. 36, No 19. – Art. L19704, P. 1–5. – doi: 10.1029/2009GL040142.
35. Le Roy Ladurie E. Histoire du Climat Depuis L’an Mil. – Paris: Flammarion, 1967. – 287 p.
36. Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations // *Geophys. Res. Lett.* – 1999. – V. 26, No 6. – P. 759–762. – doi: 10.1029/1999GL900070.
37. Esper J., Frank D.C., Wilson R.J.S., Briffa K.R. Effect of scaling and regression on reconstructed temperature amplitude for the past millennium // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – V. 32, No 7. – Art. L07711, P. 1–5. – doi: 10.1029/2004GL021236.
38. Alley R.B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland // *Quat. Sci. Rev.* – 2000. – V. 19, No 1–5. – P. 213–226. – doi: 10.1016/S0277-3791(99)00062-1.
39. Archibald D. The Past and Future of Climate. – City Beach, Aust.: Rhaetian Manage. Pty Ltd. – 2010. – 142 p.
40. Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A. Grand minima and maxima of solar activity: New observational constraints // *Astron. Astrophys.* – 2007. – V. 471, No 1. – P. 301–309. – doi: 10.1051/0004-6361:20077704.
41. Inceoglu F., Simoniello R., Knudsen V.F., Karoff C., Olsen J., Turck-Chièze S., Jacobsen B.H. Grand solar minima and maxima deduced from  $^{10}\text{Be}$  and  $^{14}\text{C}$ : Magnetic dynamo configuration and polarity reversal // *Astron. Astrophys.* – 2015. – V. 577. – Art. A20, P. 1–10. – doi: 10.1051/0004-6361/201424212.

42. *Дергачев В.А.* Палеоклимат Земли и солнечная активность // Геоматнезизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57, № 5. – С. 567–571.
43. *Mauquoy D., van Geel B., Blaauw M., van der Plicht J.* Evidence from northwest European bogs shows ‘Little Ice Age’ climatic changes driven by variations in solar activity // Holocene. – 2002. – V. 12, No 1. – P. 1–6. – doi: 10.1191/0959683602h1514rr.

Поступила в редакцию  
05.12.2020

**Арсланов Хикматулла Адиевич**, доктор геолого-минералогических наук, главный специалист  
Санкт-Петербургский государственный университет  
Университетская наб., д. 7–9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: *arslanovkh@mail.ru*

**Дергачев Валентин Андреевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Политехническая ул., д. 26, г. Санкт-Петербург, 194021, Россия  
E-mail: *v.dergachev@mail.ioffe.ru*

**Максимов Федор Евгеньевич**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник  
Санкт-Петербургский государственный университет  
Университетская наб., д. 7–9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: *maksimov-fedor@yandex.ru*

**Кудрявцев Игорь Владимирович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Политехническая ул., д. 26, г. Санкт-Петербург, 194021, Россия  
E-mail: *igor.koudriavtsev@mail.ioffe.ru*

ISSN 2542-064X (Print)  
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI  
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2022, vol. 164, no. 1, pp. 135–165

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.135-165

**Chronology of the Short-Term Climate Change during the Holocene  
in Northwestern Russia and Its Correlation with the Solar Activity Variations**

*Kh.A. Arslanov<sup>a\*</sup>, V.A. Dergachev<sup>b\*\*</sup>, F.E. Maksimov<sup>a\*\*\*</sup>, J.V. Kudryavtsev<sup>b\*\*\*\*</sup>*

<sup>a</sup>*St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia*

<sup>b</sup>*Ioffe Institute of Physics and Technology, Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, 194021 Russia*

E-mail: <sup>\*</sup>*arslanovkh@mail.ru*, <sup>\*\*</sup>*v.dergachev@mail.ioffe.ru*, <sup>\*\*\*</sup>*maksimov-fedor@yandex.ru*,  
<sup>\*\*\*\*</sup>*igor.koudriavtsev@mail.ioffe.ru*

Received December 5, 2020

**Abstract**

In 1996–1999, with our participation, a number of sections of the bog sediments in Northwestern Russia were studied to develop a chronology of the stages in the vegetation and climate evolution during the Holocene. However, the resulting chronology failed to take into account the error in determining the radiocarbon

age arising due to the changes in the concentration of atmospheric radiocarbon. To allow for this error and make the chronology more precise and reliable, here we used C. Bronk Ramsey's model based on comparing the radiocarbon chronology of the surveyed section with the calibration curve chronology. Thanks to this model, we were able to calculate the calibrated (modeled) age span of the entire series of radiocarbon dates that had been previously obtained by us for samples taken from the thickest (6.4–6.7 m) sediment layers of the raised bogs Nikolsko-Lyutinskoe, Shirinsky Mokh, and Sambal'skoe in Northwestern Russia. The deviations of the average annual temperature from its present value ( $\Delta T$ , °C), which had been represented in our earlier works as a graph, were converted into digital values and employed to define the modeled age that is most approximate to the calendar one and the corresponding values of  $\Delta T$  for all the dated samples. The  $\Delta T$  values were reconstructed for a period of 200–11000 cal yr. The modeled age of the cooling and warming stages was compared with the age of the stages of low and high solar activity established by counting the number of sunspots and by determining the concentration of cosmogenic isotopes ( $^{14}\text{C}$  in tree rings of known age and  $^{10}\text{Be}$  in polar glaciers). It was revealed that, within the error in the measured values of age and  $\Delta T$ , the short-term changes in the average annual temperature occurred simultaneously at three sites of the bog sediments under consideration. The identified changes in the average annual temperature turned out to be synchronous with similar temperature changes in the Northern Hemisphere over the last 1000 years, as well as with the chronologies developed from the GISP 2 polar ice cores and the mountain glacier advances. In general, the comparison of the modeled age of the cooling stages with the corresponding grand minima of solar activity demonstrates the synchronicity of the periods of cooling and low solar activity during the Holocene. It was concluded that short-term climate change depends mainly on variations in solar activity, which is important for predicting and modeling climate shifts.

**Keywords:** bog sediments, radiocarbon dating, age correction by modeling, paleoclimatic reconstruction, cosmogenic isotopes, correlation of climate change and solar activity

**Acknowledgments.** This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00381).

#### Figure Captions

- Fig. 1. IntCal13 calibration curve for the period of 0–14 000 years obtained by dating of the tree rings with known calendar age. Figure inserts show intervals where changes in the calibration curve can be seen: at the top – the interval of 2350–2750 cal yr, at the bottom – the interval of 2900–3100 cal yr. The red and green lines are the IntCal13 [7] and IntCal09 [8] calibration curve trends, respectively.
- Fig. 2. Depth-age dependence for the peat samples from the Nikolsko-Lyutinskoe raised bog plotted using the OxCal v4.3.2 calibration program [10]; based on the IntCal 13 calibration curve [7]. C. Bronk Ramsey's P\_Sequence model [9] was used (<https://c14.arch.ox.ac.uk>). The graphs show sample number (index), its uncalibrated radiocarbon age, and data-handling error. For example, LU-3440 R.Date (160,30) corresponds to LU-3440,  $160 \pm 30$  yr in Table 1. Modeled age, cal yr, is the age calibrated with account of the short-term variations in atmospheric  $^{14}\text{C}$  and/or the short-term variations in  $^{14}\text{C}$  associated with other causes, such as possible allochthonous input of either younger (by tree roots) or older redeposited carbon.
- Fig. 3. Reconstruction of the deviations of the average annual temperature from its current values ( $\Delta T$ ) for the period of 200–11000 years based on the analysis of the sediments in the bogs Nikolsko-Lyutinskoe (a), Shirinsky Mokh (b), and Sambal'skoe (c).
- Fig. 4. a) Large-scale changes in the radiocarbon concentration [6] measured in the blocks of tree rings of known age for the last 11 785 years (arrows show the recurrence of these changes), the error of measurements is fractions of percent. b) maximum values of the  $^{14}\text{C}$  ( $\Delta^{14}\text{C}$ ) concentration [12] over the last millennium that reoccur every 200 years, correspond to the known minima of solar activity: Wolf, Spörer, Maunder, dots show the experimental data.
- Fig. 5. Number of sunspots, smoothed by decades, during the Holocene. The major outbursts coincide with the grand minima and maxima of solar activity [40].
- Fig. 6. Changes in solar radiation,  $\text{W/m}^2$  (a); cosmic-ray neutron flux  $N$ , pulses per minute, (b); number of sunspots (c);  $^{10}\text{Be}$  concentration,  $10^4/\text{g}$ , (d) [29]; concentration of radiocarbon  $\Delta^{14}\text{C}$ , %, (e) [30]. Maunder Minimum is a significant decrease in solar activity [30].
- Fig. 7. a) Reconstruction of the air temperature in the Holocene based on the  $^{18}\text{O}$  oxygen isotope concentration in the GISP 2 ice core from in Greenland [38]: 1 – original data [38], 2 – data smoothed using a bandpass filter with a window of 500 years [24], 3 – (filtered) data smoothed using a band-

pass filter with a window of 3000 years [24]. *b*) Reconstruction of the solar activity over the last 6000 years based on the rates of  $^{14}\text{C}$  and  $^{10}\text{Be}$  generation in natural archives [23]. The rate of  $^{14}\text{C}$  generation was calculated from the  $^{14}\text{C}$  concentration in tree rings with regard to the dynamics of the carbon cycle in the ocean [33]. The rate of  $^{10}\text{Be}$  generation was measured using the  $^{10}\text{Be}$  concentration in the GRIP ice core from Greenland [32]. Both curves were smoothed (filtered) using a bandpass filter with a window of 300–3000 years. *c*) Periods of cooling and warming in the Northern Hemisphere during the Holocene (over the last 11 000 years): 1 – the end of the last glacial age; 2 – Holocene climatic optimum; 3 – Roman climatic optimum; 4 – migration episode; 5 – medieval warm period; 6 – “little glacial age”; 7 – modern warming period [39].

Fig. 8. Timespan of the large-scale temperature reconstructions for the period of 1000–1979; bold curve 1 – arithmetic mean of five reconstructions after the smoothing [37]; thin curve 2 – reconstruction of the temperature of the Northern Hemisphere [36].

### References

1. Arslanov Kh.A., Savelyeva L.A., Gey N.A., Klimanov V.A., Chernov S.B., Chernova G.M., Kuzmin G.F., Tertychnaya T.V., Subetto D.A., Denisenkov V.P. Chronology of vegetation and paleoclimatic stages of northwestern Russia during the Late Glacial and Holocene. *Radiocarbon*, 1999, vol. 41, no. 1, pp. 25–45. doi: 10.1017/S0033822200019317.
2. Arslanov Kh.A., Savelieva L.A., Klimanov V.A., Chernov S.B., Maksimov F.E., Tertychnaya T.V., Subetto D.A. New data on chronology of landscape-paleoclimatic stages in northwestern Russia during the Late Glacial and Holocene. *Radiocarbon*, 2001, vol. 43, no. 2B, pp. 581–594. doi: 10.1017/S0033822200041230.
3. Chernova G.M., Arslanov Kh.A., Denisenkov V.P., Sevastianov D.V., Tertychnaya T.V., Okuneva E.Yu., Chernov S.B. Paleoecology and biodiversity of vegetation of the northwestern Lake Ladoga region during the Holocene. *Vestn. S.-Peterb. Univ. Ser. 7*, 1997, no. 4, pp. 131–137. (In Russian)
4. Klimanov V.A. The method of quantitative reconstruction of the past climate. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. Geogr.*, 1976, no. 2, pp. 92–98. (In Russian)
5. Elina G.A., Arslanov Kh.A., Klimanov V.A. Development stages of the Holocene vegetation in the southern and eastern Karelia. *Bot. Zh.*, 1996, vol. 81, no. 3, pp. 1–17 (In Russian)
6. Stuiver M., Reimer P.J., Bard E., Beck J.W., Burr G.S., Hughen K.A., Kromer B., McCormac G., Van Der Plicht J., Spurk M. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000–0 cal BP. *Radiocarbon*, 1998, vol. 40, no. 3, pp. 1041–1083. doi: 10.1017/S0033822200019123.
7. Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, vol. 55, no. 4, pp. 1869–1887. doi: 10.2458/azu\_js\_rc.55.16947.
8. Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Burr G.S., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., McCormac F.G., Manning S.W., Reimer R.W., Richards D.A., Southon J.R., Talamo S., Turney C.S.M., van der Plicht J., Weyhenmeyer C.E. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2009, vol. 51, no. 4, pp. 1111–1150. doi: 10.1017/S0033822200034202.
9. Bronk Ramsey C. Deposition models for chronological records. *Quat. Sci. Rev.*, 2008, vol. 27, nos. 1–2, pp. 42–60. doi: 10.1016/j.quascirev.2007.01.019.
10. Bronk Ramsey C. Methods for summarizing radiocarbon datasets. *Radiocarbon*, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 1809–1833. doi: 10.1017/RDC.2017.108.
11. Klimanov V.A. Climate of northern Eurasia in the Late Glacial period (during the last climatic rhythm). In: *Korotkoperiodnye i rezkie landshafno-klimaticheskie izmeneniya za poslednie 15000 let* [Short-Term and Abrupt Changes in the Landscape and Climate over the Last 15000 Years]. Moscow, Inst. Geogr. Ross. Akad. Nauk, 1994, pp. 61–93. (In Russian)

12. Stuiver M., Quay P.D. Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun. *Science*, 1980, vol. 207, no. 4426, pp. 11–19. doi: 10.1126/science.207.4426.11.
13. Velichko A.A., Andreev A.A., Klimanov V.A. Climate and vegetation dynamics in the tundra and forest zone during the Late Glacial and Holocene. *Quat. Int.*, 1997, vols. 41–42, pp. 71–96. doi: 10.1016/S1040-6182(96)00039-0.
14. Khotinsky N.A., Klimanov V.A. Alleröd, Younger Dryas and Early Holocene palaeo-environmental stratigraphy. *Quat. Int.*, 1997, vols. 41–42, pp. 67–70. doi: 10.1016/S1040-6182(96)00038-9.
15. Novenko E.Yu., Zyuganova I.S., Olchev A.V. Application of the paleoanalog method for prediction of vegetation dynamics under climate changes, *Dokl. Biol. Sci.*, 2014, vol. 457, no. 1, pp. 228–232. doi: 10.1134/S0012496614040024.
16. Novenko E.Yu., Olchev A.V. Early Holocene vegetation and climate dynamics in the central part of the East European Plain (Russia). *Quat. Int.*, 2015, vol. 388, pp. 12–22. doi: 10.1016/j.quaint.2015.01.027.
17. Novenko E.Yu., Tsyganov A.N., Pisarchuk N.M., Volkova E.M., Babeshko K.V., Kozlov D.N., Shilov P.M., Payne R.J., Mazei Yu.A., Olchev A.V. Forest history, peatland development and mid-to late Holocene environmental change in the southern taiga forest of central European Russia. *Quat. Res.*, 2018, vol. 89, no. 1, pp. 223–236. doi: 10.1017/qua.2017.91.
18. Heikkilä M., Seppä H. An 11,000 yr palaeotemperature reconstruction from the southern boreal zone in Finland. *Quat. Sci. Rev.*, 2003, vol. 22, nos. 5–7, pp. 541–554. doi: 10.1016/S0277-3791(02)00189-0.
19. Seppä H., Poska A. Holocene annual mean temperature changes in Estonia and their relationship to solar insolation and atmospheric circulation patterns. *Quat. Res.*, 2004, vol. 61, no. 1, pp. 22–31. doi: 10.1016/j.yqres.2003.08.005.
20. Seppä H., Hammarlund D., Antonsson K. Low-frequency and high-frequency changes in temperature and effective humidity during the Holocene in south-central Sweden: Implications for atmospheric and oceanic forcings of climate. *Clim. Dyn.*, 2005, vol. 25, nos. 2–3, pp. 285–297. doi: 10.1007/s00382-005-0024-5.
21. Heikkilä M., Seppä H. Holocene climate dynamics in Latvia, eastern Baltic region: A pollen-based summer temperature reconstruction and regional comparison. *Boreas*, 2010, vol. 39, no. 4, pp. 705–719. doi: 10.1111/j.1502-3885.2010.00164.x.
22. Alley R.B., Ágústsdóttir A.M. The 8k event: Cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change. *Quat. Sci. Rev.*, 2005, vol. 24, nos. 10–11, pp. 1123–1149. doi: 10.1016/j.quascirev.2004.12.004.
23. Wanner H., Beer J., Bütikofer J., Crowley T.J., Cubasch U., Flückiger J., Goosse H., Grosjean M., Joos F., Kaplan J.O., Küttel M., Müller S.A., Prentice I.C., Solomina O., Stocker T.F., Tarasov P., Wagner M., Widmann M. Mid-to Late Holocene climate change: An overview. *Quat. Sci. Rev.*, 2008, vol. 27, nos. 19–20, pp. 1791–1828. doi: 10.1016/j.quascirev.2008.06.013.
24. Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S.P., Jetel M. Structure and origin of Holocene cold events. *Quat. Sci. Rev.*, 2011, vol. 30, nos. 21–22, pp. 3109–3123. doi: 10.1016/j.quascirev.2011.07.010.
25. Solomina O.N., Bradley R.S., Jomelli V., Geirsdóttir A., Kaufman D.S., Koch J., McKay N.P., Masiokas M., Miller G., Nesje A., Nicolussi K., Owen L.A., Putnam A.E., Wanner H., Wiles G., Yang B. Glacier fluctuations during the past 2000 years. *Quat. Sci. Rev.*, 2016, vol. 149, pp. 61–90. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.04.008.
26. Holzhauser H., Magny M., Zumbühl H.J. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *Holocene*, 2005, vol. 15, no. 6, pp. 789–801. doi: 10.1191/0959683605hl853ra.
27. Agatova A.R., Nazarov A.N., Nepop R.K., Rodnight H. Holocene glacier fluctuations and climate changes in the southeastern part of the Russian Altai (South Siberia) based on a radiocarbon chronology. *Quat. Sci. Rev.*, 2012, vol. 43, pp. 74–93. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.04.012.
28. Magny M. Holocene fluctuations of lake levels in west-central Europe: Methods of reconstruction, regional pattern, palaeoclimatic significance and forcing factors. In: Elias S.A. (Ed.) *Encyclopedia of Quaternary Science*. Vol. 2. Amsterdam, Elsevier, 2006, pp. 1389–1399.
29. Gray L.J., Beer J., Geller M., Haigh J.D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G.A., Shindell D., van Geel B., White W. Solar influences on climate. *Rev. Geophys.*, 2010, vol. 48, no. 4, art. 2009RG000282, pp. 1–53. doi: 10.1029/2009RG000282.

30. Attolini M.R., Cecchini S., Galli M., Kocharov G.E., Nanni T. 400 year record of  $\Delta^{14}\text{C}$  in tree rings: The solar-activity cycle before, during and after maunder minimum and the longer cycles. *Il Nuovo Cimento C*, 1993, vol. 16 C, no. 4, pp. 419–436. doi: 10.1007/BF02507651.
31. Arslanov Kh.A. *Radiouglerod: geokhimiya i geokhronologiya* [Radiocarbon: Geochemistry and Geochronology]. Shchukolyukov Yu.A. (Ed.). Leningrad, Izd. Leningr. Univ., 1987. 300 p. (In Russian)
32. Vonmoos M., Beer J., Muscheler R. Large variations in Holocene solar activity: Constraints from  $^{10}\text{Be}$  in the Greenland Ice Core Project ice core. *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, no. A10, art. A10105, pp. 1–14. doi: 10.1029/2005JA011500.
33. Müller S.A., Joos F., Edwards N.R., Stocker T.F. Water mass distribution and ventilation time scales in a cost-efficient, three-dimensional ocean model. *J. Clim.*, 2006, vol. 19, no. 21, pp. 5479–5499. doi: 10.1175/JCLI3911.1.
34. Steinhilber F., Beer J., Fröhlich C. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, vol. 36, no. 19, art. L19704, pp. 1–5. doi: 10.1029/2009GL040142.
35. Le Roy Ladurie E. *Histoire du Climat Depuis L'an Mil*. Paris, Flammarion, 1967. 287 p. (In French)
36. Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, vol. 26, no. 6, pp. 759–762. doi: 10.1029/1999GL900070.
37. Esper J., Frank D.C., Wilson R.J.S., Briffa K.R. Effect of scaling and regression on reconstructed temperature amplitude for the past millennium. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, vol. 32, no. 7, art. L07711, pp. 1–5. doi: 10.1029/2004GL021236.
38. Alley R.B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quat. Sci. Rev.*, 2000, vol. 19, nos. 1–5, pp. 213–226. doi: 10.1016/S0277-3791(99)00062-1.
39. Archibald D. *The Past and Future of Climate*. City Beach, Aust., Rhaetian Manage. Pty Ltd, 2010. 142 p.
40. Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A. Grand minima and maxima of solar activity: New observational constraints. *Astron. Astrophys.*, 2007, vol. 471, no. 1, pp. 301–309. doi: 10.1051/0004-6361:20077704.
41. Inceoglu F., Simoniello R., Knudsen V.F., Karoff C., Olsen J., Turck-Chièze S., Jacobsen B.H. Grand solar minima and maxima deduced from  $^{10}\text{Be}$  and  $^{14}\text{C}$ : Magnetic dynamo configuration and polarity reversal. *Astron. Astrophys.*, 2015, vol. 577, art. A20. doi: 10.1051/0004-6361/201424212.
42. Dergachev V.A. Paleoclimate of the Earth and solar activity. *Geomagn. Aeron.*, 2017, vol. 57, no. 5, pp. 524–528. doi: 10.1134/S0016793217050073.
43. Mauquoy D., van Geel B., Blaauw M., van der Plicht J. Evidence from northwest European bogs shows 'Little Ice Age' climatic changes driven by variations in solar activity. *Holocene*, 2002, vol. 12, no. 1, pp. 1–6. doi: 10.1191/0959683602hl514rr.

**Для цитирования:** Арсланов Х.А., Дергачев В.А., Максимов Ф.Е., Кудрявцев И.В. Хронология короткопериодных вариаций климата в голоцене на Северо-Западе России и корреляция с вариациями солнечной активности // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2022. – Т. 164, кн. 1. – С. 135–165. – doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.135-165.

**For citation:** Arslanov Kh.A., Dergachev V.A., Maksimov F.E., Kudryavtsev J.V. Chronology of the short-term climate change during the Holocene in Northwestern Russia and its correlation with the solar activity variations. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2022, vol. 164, no. 1, pp. 135–165. doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.135-165. (In Russian)