

Прогноз температурных изменений на Алтае в ближайшие 50 лет по реконструированным данным ледникового керна с горы Белуха

© 2013 г. Т.С. Папина, О.В. Ловцкая, Н.С. Малыгина, С.С. Эйрих

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

papina@iwep.ru

Статья принята к печати 25 декабря 2012 г.

Алтай, ледниковый керн, прогноз климатических изменений, Фурье-анализ.
Altai, forecast of climate change, Fourier analysis, ice core.

С помощью спектрального Фурье-анализа разложен на несколько разнопериодных синусоидальных функций временной ряд палеотемператур, реконструированный по изменению значения $\delta^{18}\text{O}$ в высокогорном ледниковом керне с седловины горы Белуха. В полученной периодограмме выделены основные гармоники, которые позволили без учёта вклада изменений существующей антропогенной нагрузки сделать сценарные прогнозы среднегодовых (с марта по ноябрь) температурных изменений на Алтае до 2050 г. Прогноз показал, что с 2008 г. температурный режим Алтая входит в фазу похолодания, максимум которой будет достигнут к 2020 г. Затем начнётся 15-летний период повышения температуры, а после 2035 г. вновь наступит фаза похолодания. Полученный нами прогноз согласуется с прогностическими оценками природной составляющей климатической изменчивости, полученными другими исследователями.

Введение

Для создания надёжных прогнозных моделей климатических и экологических изменений природной среды необходимы ряды данных высокого временного разрешения — годовые и сезонные [41]. Основной источник таких данных — глобальные системы мониторинга, обеспечивающие получение разноплановых инструментальных данных о состоянии поверхностных оболочек Земли [9, 11]. Однако длина этих рядов в большинстве случаев не превышает первые сотни лет, что недостаточно для достоверного прогнозирования изменений в обозримом будущем. Поэтому для получения длинных рядов климатических изменений используют данные реконструкций прошлых состояний атмосферы по различным стратифицируемым природным накопителям — полярным и высокогорным ледникам, донным отложениям, древесным кольцам и пр. [17].

Среди природных палеоархивов особое место отводится высокогорным ледникам, исследование которых, несмотря на трудоёмкость отбора проб, анализа и интерпретации результатов, позволяет получить ценную палеоклиматическую информацию высокого временного разрешения как на глобальном, так и на региональном уровнях [12]. В высокогорных ледниках основой для реконструкции палеотемператур служит изотопный состав кислорода и водорода, входящих в состав молекул воды ледникового керна. При этом величина $\delta^{18}\text{O}$ связана со среднегодовой температурой воздуха прямым соотношением,

однако вид этой связи различен для разных временных интервалов и регионов. Поэтому с 1961 г. Международное агентство по атомной энергии (ИАЕА) совместно с Всемирной метеорологической организацией (ВМО), наряду с измерением температуры воздуха, проводят ежемесячные измерения изотопного состава осадков на всех станциях сети наблюдения. Эти данные могут быть использованы для определения соотношения средних значений $\delta^{18}\text{O}$ в осадках и средних значений температур поверхности $T_{\text{п}}$ для различных изучаемых территорий.

Постановка проблемы и объекты исследования

Проводимые учёными разных стран исследования позволяют с помощью глобальных климатических моделей строить сценарии изменения климата на длительный срок. Признавая важность таких исследований, необходимо отметить, что к одному из факторов, ограничивающих уверенность в перспективной оценке изменения климата, относится неопределённость внешнего воздействия (например, будущей концентрации атмосферного диоксида углерода и других парниковых газов, а также сульфатного аэрозоля). Кроме того, если в Четвёртом оценочном докладе МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) будущие изменения климата рассматривались только как отклик на увеличение концентрации парниковых и других газов, то в Международном проекте CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project



Рис. 1. Расположение места отбора ледникового керна с горы Белуха
Fig. 1. Location of ice core Belukha sampling

Phase 5) впервые делается попытка предсказания изменений климата на ближайшие 10–30 лет с учётом естественной изменчивости. На временных масштабах 10–30 лет естественная изменчивость может быть сравнима, а в некоторых регионах даже превосходить вклад от парникового эффекта. Так, именно сочетанием глобального потепления и естественных колебаний климата можно объяснить быстрое уменьшение площади летнего льда в Арктике в последние годы, а также зимнее потепление конца 1980–90-х годов на Европейской части России [3].

В докладах МГЭИК неоднократно подчёркивалась необходимость детального исследования происходящих и предполагаемых в будущем региональных изменений климата [11, 13]. Для России и стран бывшего СНГ отмечалось, что даже прошедшие климатические изменения при наличии существующих наблюдений можно оценить лишь с некоторой долей неопределённости, к главным причинам которой относятся нарушения однородности рядов наблюдений, недостаточная плотность сети и её изменения, а также различия алгоритмов пространственного осреднения данных [1]. Для настоящего времени детализированные по регионам оценки наблюдаемых и предполагаемых изменений климата особенно важны, поскольку значительные природно-обусловленные различия в разных регионах России вызывают крайне неравномерное изменение климата.

Наиболее чётко климатические изменения можно установить на границе раздела природно-климатических зон. Для Центрально-Азиатского региона такое место раздела – Алтай – обширная горная страна, расположенная на северо-западной периферии Центральной Азии, на границе четырёх государств – России, Монголии, Казахстана и Китая. Алтай служит орографическим барьером для

западного переноса воздушных масс и находится на границе раздела между тайгой и пустынными и полупустынными районами Центральной Азии. Изучаемый регион особенно интересен для исследований климатических изменений регионального уровня, которые могут базироваться в том числе и на репрезентативных данных Алтайских палеоархивов.

Цель нашей работы – прогноз естественных природных температурных изменений на Алтае на ближайшие 50 лет по данным ледникового керна горно-ледникового массива Белуха (рис. 1), так как наиболее крупные высокогорные ледники Алтая сосредоточены именно в этом массиве. Ледники массива Белуха – самой высокой точки Алтая (4506 м) – имеют максимальную вертикальную протяжённость, большой высотный диапазон (от 1970 до 4506 м) и ориентированы по всем основным румбам [6], что обуславливает резкие различия в количестве осадков и поступлении солнечной радиации, во многом определяющих режимы массообмена ледников. В июле 2001 г. совместной Российско-Швейцарской экспедицией на седловине горы Белуха, (49°48'26,3" с.ш., 86°34'42,8" в.д., высота 4062 м) был отобран 140-метровый ледниковый керн, который в замороженном виде был доставлен в лабораторию радиохимии и химии окружающей среды Института им. Поля Шеррера (Швейцария) для дальнейшего гляциохимического анализа.

Методы исследования

Датирование слоёв ледникового керна с горы Белуха проводили на основе визуальной стратиграфии, сезонных изменений концентраций $\delta^{18}\text{O}$ и NH_4^+ , активности ^{210}Pb , а также стратиграфических маркеров: пиковых значений концентрации сульфатов, связанных с извержениями вулканов

Тамбора и Катмай соответственно в 1815 и 1912 гг., и максимальных значений концентраций трития и плутония для 1963 и 1945 гг. (соответственно взрыв термоядерной и ядерной бомб в атмосфере) [22, 31, 32]. Для уточнения датирования нижележащих слоёв керна применяли стационарную модель течения льда [18, 29], в основу которой положены репрезентативные оценки осадконакопчений на поверхности ледника и постоянные значения вертикальных скоростей деформации [21]. Эффективность использования этой модели обоснована в работе [22]. Палеотемпературы реконструированы по изменению значений $\delta^{18}\text{O}$ в ледниковом керне седловины горы Белуха с привлечением материалов, полученных в режиме реального времени по сети IAEA GNIP [42, 36, 37]. Для девяти станций Центральной Азии (70–120° в.д. и 35–60° с.ш.), которые не испытывали значительного влияния муссонной циркуляции, были получены ежемесячные данные для 1990-х годов, позволившие реконструировать $T_{\text{п}}$ по данным $\delta^{18}\text{O}$ в осадках [15, 39, 42].

Методика определения $\delta^{18}\text{O}$ включала в себя пиролиз талой воды проб льда в стеклоуглеродном реакторе при температуре 1450 °C с образованием оксида углерода (CO) [20, 24]. Затем относительные пропорции образовавшихся $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ и $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ определяли с помощью изотопного масс-спектрометра Delta Plus XL, Finnigan MAT. Точность определения составляла $\pm 0,2\%$ [22, 31]. Для выявления периодических зависимостей температурного ряда и разработки сценарного прогноза температурных изменений ближайшего будущего использовался метод спектрального анализа на основе преобразования Фурье [2].

Результаты и их обсуждение

По данным близлежащей к ледниковому массиву Белуха ГМС Ак-Кем определено, что основное осадконакопление на изучаемом леднике наблюдается с марта по ноябрь (до 80–90%). Для выявления зависимости между соотношением $\delta^{18}\text{O}$ в ледниковом керне горы Белуха и приповерхностной температурой $T_{\text{п}}$ изучены соотношения средних значений $\delta^{18}\text{O}$ в осадках и средних значений температуры поверхности $T_{\text{п}}$ (с марта по ноябрь) по девяти близлежащим к леднику станциям Центральной Азии, которые входят в сеть IAEA GNIP (рис. 2) [22]. Для этого использовались результаты ежемесячных измерений изотопного состава осадков, полученных на этих станциях за период 1960–2000 гг.

Значение наклона зависимости изменения $\delta^{18}\text{O}$ от температуры $(0,55 \pm 0,26)\text{‰}/^\circ\text{C}$ (см. рис. 2) хорошо согласуется с результатами, установлен-

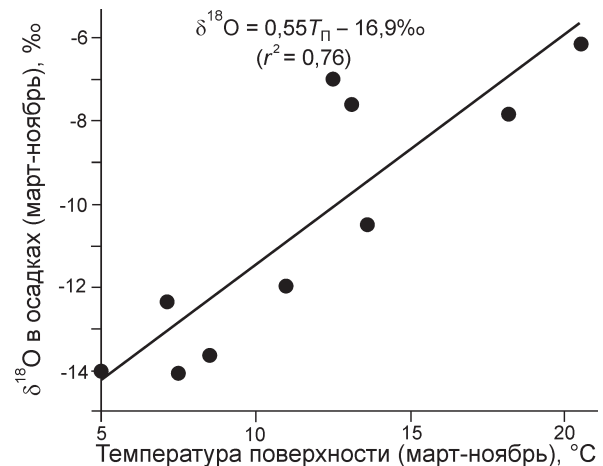


Рис. 2. Соотношения средних значений $\delta^{18}\text{O}$ в осадках и средних значений $T_{\text{п}}$ по данным станций Центральной Азии [22]
Fig. 2. Linear relationship between averages of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation surface and air temperature ($T_{\text{сfc}}$) at GNIP stations in Central Asia [22]

ными для других высокогорных районов Центральной Азии, например для Тянь-Шаня: $\delta^{18}\text{O} = (0,6T_{\text{п}} - 5,6)\text{‰}$ [14], а также для большей части Северного Тибета: $\delta^{18}\text{O} = (0,6T_{\text{п}} - 12)\text{‰}$ [25, 40]. Поэтому значение наклона, равное $(0,55 \pm 0,26)\text{‰}/^\circ\text{C}$, использовалось для определения температурных отклонений по данным $\delta^{18}\text{O}$ в ледниковом керне с седловины горы Белуха и построения изотопной кривой, на основе которых реконструированы палеотемпературы за 1250–2000 гг. [19].

Для оценки надёжности реконструированной температурной кривой использованы инструментальные данные по температуре, полученные на ГМС Барнаул за последние 150 лет. Хорошая корреляционная зависимость между $\delta^{18}\text{O}$ и усреднённой температурой по ГМС Барнаул с марта по ноябрь за 1850–2000 гг. ($r^2 = 0,78$, $p < 0,0015$) показывает, что полученная изотопная кривая $\delta^{18}\text{O}$ достоверна и чувствительна к температурным изменениям в Алтайском и Центрально-Азиатском регионах в целом. Чтобы установить периодические зависимости полученного температурного ряда [19] и разработать сценарный прогноз климатических температурных изменений на ближайшее будущее (рис. 3), выполнен спектральный анализ на основе преобразования Фурье [2]. Для согласования результатов выделения основных гармоник с имеющимися данными обработан укороченный ряд 1250–1980 гг. (730 лет). Это позволило исключить возможные искажения данных, связанные с наблюдающимся летом в 1980–2000 гг. поверхностным таянием ледника и возможным промачиванием ни-

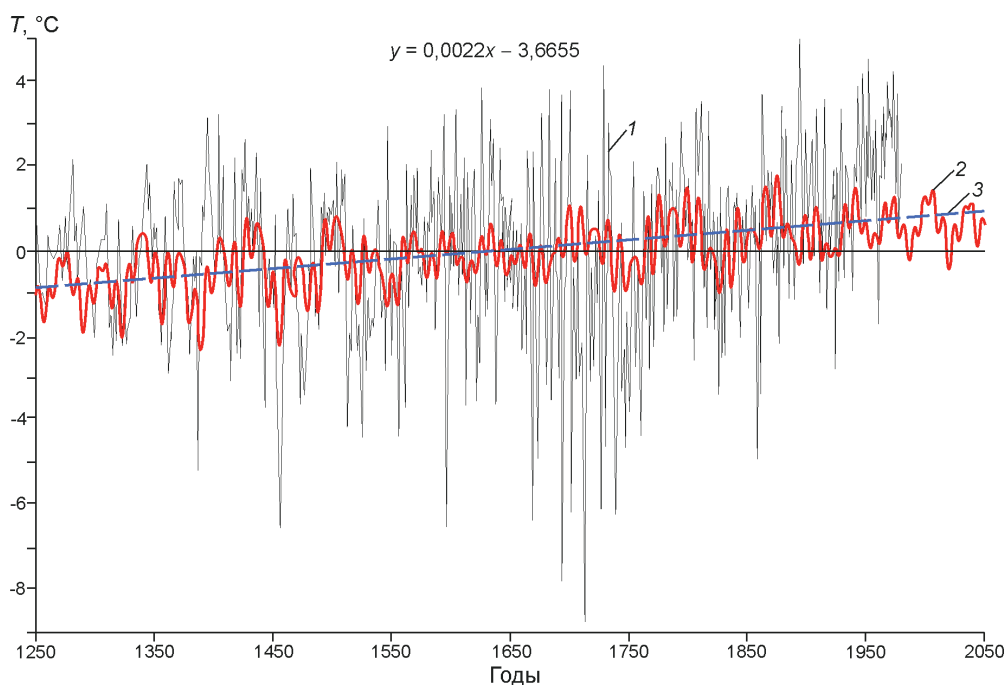


Рис. 3. Циклический тренд температурной аномалии, реконструированной по содержанию $\delta^{18}\text{O}$ в керне ледника Белуха (1250–1980 гг.), и прогноз его поведения до 2050 г.

1 – температура T , °C, реконструированная по керну; 2 – прогноз изменений температур (семь гармоник); 3 – линейный тренд температуры (°C), реконструированной по керну

Fig. 3. Cyclic temperature anomaly trend, reconstructed from the $\delta^{18}\text{O}$ in the Belukha ice core (1250–1980), and forecast its behavior up to 2050.

1 – temperature T , °C, reconstructed from the ice core; 2 – forecast of the temperature changes (seven harmonics); 3 – linear trend of temperature (°C) reconstructed from the ice core

железистых годовых слоёв [22, 30]. В соответствии со стандартными требованиями [2] для повышения стационарности исследуемый временной ряд подвергнут предварительной процедуре вычитания среднего и линейного трендов.

В результате проведённого Фурье-анализа температурной кривой сначала были выделены 365 циклов. В соответствии с рекомендациями [4] из полученных 365 циклов исключены циклы, продолжительностью более 182 лет, т.е. циклы больше 1/4 длины изучаемого нами температурного ряда (730/4). Для дальнейшего анализа отобраны семь циклов с наибольшим значением спектральной плотности, т.е. циклы, вносящие максимальный вклад в периодическое поведение всего ряда. Полученные результаты приведены в таблице. Таким образом, в выделенном нами временном интервале изучаемого температурного режима к частотам, имеющим наибольшее значение спектральной плотности, относятся гармоники с периодами 33,2 (31,7), 73 и 91,3 гг., близкие к периодам вулканической активности и естественной изменчивости климатической системы, а также гармоники, соответствующие периодам солнечной активности и активности бариче-

ских осцилляций, – 10,9 (8,3 и 11,2) гг., что не противоречит известным многочисленным литературным источникам [7, 8, 19, 26–28, 33–35, 38].

Следуя утверждению [7], что наибольший интерес для оценки периодичности климатических процессов представляет собой диапазон от 20 до 100 лет, мы выполнили прогноз как по трём гармоникам временного ряда, лежащим в этом диапазоне (периоды 33, 73 и 91,3 гг.), так и по всем семи выделенным гармоникам (см. таблицу). Прогнозная кривая, рассчитанная по выбранным периодам, дана на рис. 3. Для верификации полученные результаты сопоставлены с инструментальными данными по ГМС Барнаул за весь период наблюдений (1838–2008 гг.). Для наглядности на рис. 4 показан временной период, начиная с 1960 г. Ход изменчивости графиков на рис. 4 на совпадающем для них временном интервале достаточно согласован. Дополнительно на графике можно видеть хорошее согласование данных инструментальных наблюдений и выполненного нами прогноза по семи основным гармоникам для временного интервала 1980–2008 гг., что позволяет рассматривать экстраполяцию прогнозных кривых на будущее как один

Результаты спектрального анализа температурного ряда, реконструированного по ледниковому ядру массива Белуха, с исключённым линейным трендом

Частота	Период, годы	Коэффициент cos/sin	Периодограмма	Спектральная плотность
0,0137	73	-0,267/0,178	37,64	26,56
0,0301	33,2	-0,214/-0,25	39,49	26,27
0,0315	31,7	0,129/-0,255	29,76	26,23
0,0110	91,3	0,221/-0,166	27,92	24,66
0,1205	8,3	-0,037/0,305	34,38	22,67
0,0918	10,9	-0,140/0,295	38,96	22,66
0,089	11,2	0,128/-0,245	27,83	14,61

из возможных сценариев эволюции климата. В соответствии с этим сценарием вероятен колебательный процесс с похолоданием в ближайшее десятилетие (минимум похолодания в 2020 г.), затем 15-летний период небольшого повышения температуры, а потом вновь период похолодания.

Полученный нами прогноз изменения температуры лежит в пределах 1,5 °С, а тренд его изменения

согласуется с временным ходом средней годовой аномалии температуры приземного воздуха (°С), осреднённой по территориям России [10] и Алтае-Саянского экорегиона [5], в основу прогноза которых положены сценарии, учитывающие эволюцию эмиссии парниковых газов в атмосферу (CO₂, CH₄, N₂O и др.). Циклический ход нашего температурного прогноза хорошо согласуется с прогнозом, сделан-

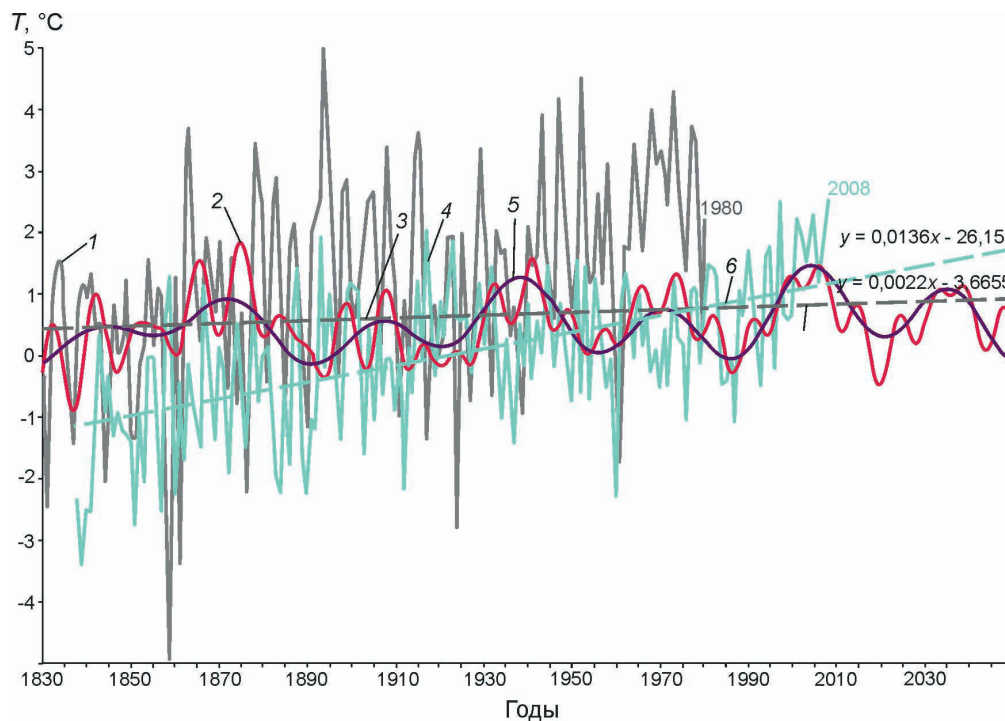


Рис. 4. Циклический тренд температурной аномалии, реконструированной по содержанию $\delta^{18}\text{O}$ в ледниковом ядре с седловины горы Белуха (1250–1980 гг.), и прогноз его поведения до 2050 г., сопоставленный с инструментальными данными ГМС Барнаул (фрагмент с 1960 г.).

1 – температура T , °С, реконструированная по ядру; 2 – прогноз изменений температур (семь гармоник); 3 – линейный тренд температурой реконструкции (°С); 4 – температура T , °С, по ГМС Барнаул (III–XI); 5 – прогноз изменений температур (три гармоник); 6 – линейный тренд температуры (°С) по ГМС Барнаул (III–XI)

Fig. 4. Cyclic temperature anomaly trend, reconstructed from the $\delta^{18}\text{O}$ in the Belukha ice core (1250–1980), and forecast its behavior up to 2050 associated with the instrumental data GMS Barnaul (fragment from 1960).

1 – temperature T , °С, reconstructed from the ice core; 2 – forecast of the temperature changes (seven harmonics); 3 – linear trend of temperature (°С) reconstructed from the ice core; 4 – temperature T , °С, at GMS Barnaul (III–XI); 5 – forecast of the temperature changes (three harmonics); 6 – linear trend of temperature (°С) at GMS Barnaul (III–XI)

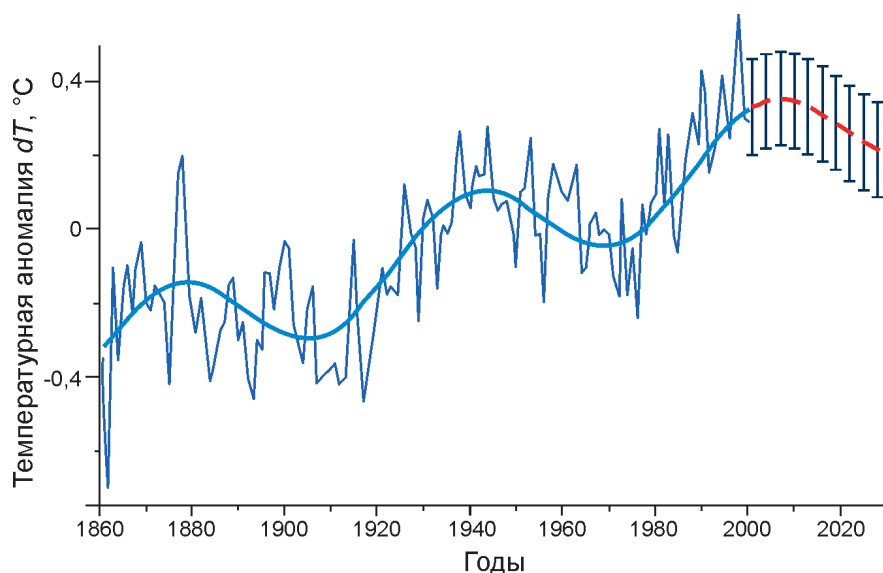


Рис. 5. Циклический тренд глобальной температурной аномалии (толстая линия), межгодовые вариации dT (тонкая линия) и поведение тренда на 2000–2030 гг. (толстая штриховая линия с вертикальными засечками стандартных отклонений) [7]

Fig. 5. Cyclic trend of the global temperature anomaly (thick line), interannual variations of dT (thin line) and the trend in 2000–2030 (thick dashed line with vertical notches of standard deviations) [7]

ным по изменению средней температурной аномалии приземного слоя воздуха (глобальной dT) за последние 150 лет (рис. 5), где также, начиная с 2008 г., прогнозируется период похолодания. Таким образом, подтверждается достоверность нашего прогноза, так как осреднённая по всем пунктам измерений средняя температурная аномалия приземного слоя воздуха (глобальная dT) рассматривается как наиболее важный индекс, характеризующий долгопериодные флуктуации климата Земли в целом [16, 23].

Выводы

Спектральный Фурье-анализ реконструированной температурной кривой по ледниковому керну горы Белуха за период 1250–1980 гг. позволил сделать прогноз изменения среднегодовой (с марта по ноябрь) температуры на Алтае до 2050 г. Прогноз показал, что с 2008 г. на Алтае наступила фаза похолодания (изменение в пределах $1,5^\circ\text{C}$), максимум которой будет достигнут к 2020 г. Затем после 15-летнего периода повышения температуры после 2035 г. начнётся вновь период похолодания. Такой температурный прогноз хорошо согласуется с литературными данными прогностических оценок естественной составляющей климатической изменчивости.

Литература

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Ренева С.А. Неопределённость оценок изменений климата 20 и начала 21 веков по данным наблюдений на территории России // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 10. С. 31–41.
2. Боровиков В.П., Ивченко Г.И. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде Windows: Основы теории и интенсивная практика на компьютере. М.: Финансы и статистика, 2000. 384 с.
3. Володин Е.М. Использование климатической модели ИВМ РАН при подготовке 5-го Оценочного доклада МГЭИК // *Изменение климата: Ежемесячный инф. бюл.* 2010. № 10. С. 8–11.
4. Дэвис Дж.С. Статистический анализ в геологии: В 2 кн. Кн. 1. М.: Недра, 1990. 319 с.
5. Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: Оценочный доклад / Под ред. А.О. Кокорина. М.: изд. Всемирного фонда дикой природы (WWF России), 2011. 168 с.
6. Каталог ледников СССР: Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Алтай и Верхний Иртыш. Ч. 8. Бассейны рек Моген-Бурен и Каргы / В.С. Ревякин, М.А. Душкин. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 79 с.
7. Кляшторин Л.Б., Любушин А.А. Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. М.: изд. ВНИРО, 2005. 235 с.
8. Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
9. МГЭИК, 2007: Изменение климата, 2007 г.: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Р.К. Пачаури., А. Райзингер и основная группа авторов (ред.)]. Женева, 104 с.
10. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Т. 1. Изменения климата. М.: изд. Росгидромета, 2008. 227 с.
11. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: изд. Росгидромета, 2008. 29 с.
12. Папина Т.С., Малыгина Н.С., Митрофанова Е.Ю. Сравнение реконструкций изменения температуры на Алтае за последние 750 лет по данным ледника г. Белуха и донным осадкам Телецкого озера // *Лёд и Снег*. 2011 № 1 (113). С. 114–118.
13. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. М.: изд. Росгидромета, 2005. 28 с.
14. Aizen V., Aizen E., Melack J., Martma T. Isotopic measurements of precipitation on central Asian glaciers (southeastern

- Tibet, northern Himalayas, central Tien Shan) // *Journ. of Geophys. Research*. 1996. № 101 (D 4). P. 9185–9196.
15. *Araguás-Araguás L., Fröhlich K.* Stable isotope composition of precipitation over south-east Asia // *Journ. of Geophys. Research*. 1998. № 103. P. 28721–28742.
 16. *Bell G., Halpert M., Schnell R., Higgins R., Lavrimor J., Kousky V., Tinker R., Thiaw W., Chelliah M., Artusa A.* Climate assessment for 1999 // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2001. V. 81. № 6. P. 1328–1350.
 17. *Bradley R. S., Briffa K.R., Cole J., Hughes M.K., Osborn T.J.* The climate of the last millennium // *Paleoclimate, Global Change and the Future*. Berlin: Springer-Verlag, 2003. P. 105–141.
 18. *Dansgaard W., Johnsen S.J.* A flow model and a time scale for the ice core from Camp Century, Greenland // *Journ. of Glaciology*. 1969. V. 8. P. 215–223.
 19. *Eichler A., Olivier S., Henderson K., Laube A., Beer J., Papina T., Gaggeler H.W., Schwikowski M.* Temperature response in the Altai region lags solar forcing // *Geophys. Research Letters*. 2009. V. 36. L01808. doi:10.1029/2008GL035930.
 20. *Gehre M., Strauch G.* High-temperature elemental analysis and pyrolysis techniques for stable isotope analysis // *Rapid Commun. Mass Spectrum*. 2003. V. 17. P. 1497–1503.
 21. *Haefeli R.* Contribution to the movement and the form of ice sheets in the Arctic and Antarctic // *Journ. of Glaciology*. 1961. V. 3. № 30. P. 1133–1151.
 22. *Henderson K.A., Laube A., Gaggeler H.W., Olivier S., Papina T., Schwikowski M.* Temporal variations of accumulation and temperature during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai // *Journ. of Geophys. Research*. 2006. V. 111. D03104. doi:10.1029/2005JD005819.
 23. *Jones P.D., Osborn T., Briffa K., Folland C., Norton E., Alexander L., Parker D., Rayner N.* Adjusting for sampling density in grid box land and ocean surface temperature time series // *Journ. of Geophys. Research*. 2001. V. 106. P. 3371–3380.
 24. *Kornel B.E., Gehre M., Hofling R., Werner R.A.* On-line $\delta^{18}\text{O}$ measurement of organic and inorganic substances // *Rapid Commun. Mass Spectrum*. 1999. V. 13. P. 1685–1693.
 25. *Lin P.N., Thompson L.G., Davis M.E., Mosley-Thompson E.* 1000 years of climatic change in China: Ice core $\delta^{18}\text{O}$ evidence // *Annals of Glaciology*. 1995. V. 21. P. 189–195.
 26. *Minobe S.* A 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America // *Geophys. Research Letters*. 1997. V. 24. P. 683–686.
 27. *Minobe S.* Resonance in bi-decadal and penta-decadal climate oscillations over the North Pacific: role in climatic regime shifts // *Geophys. Research Letters*. 1999. V. 26. P. 855–858.
 28. *Minobe S.* Spatio-temporal structure of the pentadecadal climate oscillations over the North Pacific // *Progress in Oceanography*. 2000. V. 47. P. 381–408.
 29. *Nye J.F.* Correction factor for accumulation measured by the thickness of the annual layers in an ice sheet // *Journ. of Glaciology*. 1963. V. 4. P. 785–788.
 30. *Oliver S.* Atmospheric and climate history of the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai. Inaugural dissertation. Bern: der Philosophisch-naturwissenschaftlichen fakultät der Universität Bern, den 22.12.2004. 147 p.
 31. *Olivier S., Schwikowski M., Brütsch S., Eirich S., Gaggeler H.W., Lüthi M., Papina T., Saurer M., Schotterer U., Tobler L., Vogel E.* Glaciochemical investigation of an ice core from Belukha Glacier, Siberian Altai // *Geophys. Research Letters*. 2003. V. 30. № 19. P. 2019–2022. doi:10.1029/2003GL018290.
 32. *Olivier S., Bajo S., Fifield L.K., Gaggeler H.W., Papina T., Santschi P.H., Schotterer U., Schwikowski M., Wacker L.* Plutonium from global fallout recorded in an ice core from the Belukha Glacier, Siberian Altai // *Environ. Science Technology*. 2004. V. 38. P. 6507–6512.
 33. *Robock A.* Volcanic eruption and climate // *Review Geophysics*. 2000. V. 38. № 2. P. 191–219. doi:10.1029/1998RG000054.
 34. *Robock A., Free M.P.* Ice cores as an index of global volcanism from 1850 to the present // *Journ. of Geophys. Research*. 1995. V. 100. P. 11549–11567.
 35. *Robock A., Free M.P.* The volcanic record in ice core for the past 2000 years // *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years*. New York: Springer-Verlag, 1996. P. 533–546.
 36. *Rozanski K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R.* Isotope patterns in modern global precipitation // *Climate Change in Continental Isotopic Records*. *Geophys. Monograph. Ser.* 1993. V. 78. P. 1–36.
 37. *Rozanski K., Johnsen S.J., Schotterer U., Thompson L.G.* Reconstruction of past climates from stable isotope records of palaeo-precipitation preserved in continental archives // *Hydrological Science Journ.* 1997. V. 42. № 5. P. 725–745.
 38. *Schlesinger M.E., Ramankutty N.* An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // *Nature*. 1994. V. 376. P. 723–726.
 39. *Tian L., Masson-Delmotte V., Stievenard M., Yao T., Jouzel J.* Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes // *Journ. of Geophys. Research*. 2001. V. 106 (D22). P. 28081–28088.
 40. *Yao T., Thompson L.G.* Trends and features of climatic changes in the past 5000 years recorded by the Dunde ice core // *Annals of Glaciology*. 1992. V. 16. P. 21–24.
 41. <http://www.emep.int> EMEP (European Monitoring and Evaluation Program). Европейская совместная программа мониторинга и оценки переноса воздушных загрязнений на большие расстояния. Резюме промежуточного доклада целевой группы по переносу загрязнителей воздуха в масштабах полушария. Пункт 4 предварительной повестки дня. Тридцать первая сессия. Исполнительный орган по конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. Европейская Экономическая Комиссия. ECE/EB.AIR/GE.1/2007/13, 22 June 2007. С. 6.
 42. <http://isohis.iaea.org> Vienna IAEA/WMO, 2004. International Atomic Energy Agency / World Meteorological Organization (2004). Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database.

Summary

Paleotemperature time series reconstructed from $\delta^{18}\text{O}$ changes in Belukha ice core were expanded into several heteroperiodic sinusoidal functions with the help of the spectral Fourier analysis. The main harmonics selected from obtained periodogram have allowed to perform (without taking into account the contribution of changes in the existing anthropogenic load) scenario forecasts of average annual (from March to November) temperature changes in the Altai region in the nearest future (until 2050). Forecast shows that a cold phase came to Altai since 2008 reaches its maximum by 2020. Then after the 15-year period of temperature increase a cold phase will come back after 2035. Our forecast agrees very well with the forecast made from the natural climatic variability (for example, the change of global temperature for the last 150 years).