

Взаимные изменения температуры и содержания аэрозоля в атмосфере по данным антарктических ледовых кернов для последних 800 тысяч лет

И.И. Мохов^{1,2,*}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики атмосферы
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3
(Поступила в редакцию 01.03.2023; после доработки 17.03.2023; принята к публикации 17.03.2023)

Проведен сравнительный анализ взаимных изменений температуры и содержания аэрозоля в атмосфере по данным антарктических ледовых кернов, полученных на российской станции Восток и в рамках международного проекта EPICA для последних 800 000 лет. Согласно результатам кросс-вейвлетного анализа для последних сотен тысяч лет вариации содержания в атмосфере аэрозоля, как и содержания парниковых газов CO₂ и CH₄, в целом запаздывают относительно изменений температуры для доминирующих в пределах последнего миллиона лет ледниковых циклов с периодами около 100 тысяч лет, связанных с изменением эксцентриситета орбиты Земли вокруг Солнца. При этом для более короткопериодных ледниковых циклов на отдельных временных интервалах проявляются противоположные эффекты с запаздыванием температурных вариаций относительно вариаций содержания в атмосфере радиационно-активных составляющих, включая морской и континентальный аэрозоль. В частности, запаздывание температурных вариаций относительно вариаций содержания в атмосфере аэрозоля (как и относительно вариаций содержания в атмосфере метана) проявляется для связанных с изменениями угла наклона оси вращения Земли мод с периодами около 40 тысяч лет.

PACS: 92.60.Ry. УДК: 551.583.

Ключевые слова: палеоклиматические реконструкции, антарктические ледовые керны, станция Восток, EPICA, температурные изменения, радиационно-активные атмосферные составляющие, морской и континентальный аэрозоли.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2330903](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2330903)

ВВЕДЕНИЕ

В климатических исследованиях особо значимы проекты, связанные с получением и анализом данных ледовых кернов. Эти палеоданные, включающие, наряду с информацией о климатическом (температурном) режиме, информацию о составе атмосферы, в том числе о содержании в атмосфере радиационно-активных компонентов, позволяют диагностировать причинно-следственные связи в земной климатической системе (ЗКС) на разных временных горизонтах [1, 2] (см. также [3]).

Пионерские исследования были проведены с использованием палеоданных о температурном режиме и содержании в атмосфере парниковых газов, а также разных типов по результатам анализа воздуха в пузырьках ледовых кернов, полученных на российской антарктической станции Восток. Ледовое бурение на станции Восток было начато в 1970 г. Первые результаты с анализом данных ледовых кернов были опубликованы полвека назад [4] (см. также [5–9]). В дальнейшем широкий резонанс в мире получили результаты анализа взаимных изменений температуры T и содержания в атмосфере CO₂

(qCO₂) и CH₄ (qCH₄), а также морского (q(Na)) и континентального (q(D)) аэрозолей за последние более 400 тысяч лет [10–14] (см. также [15–17]). Вариации T и содержания в атмосфере CO₂ (qCO₂) и CH₄ (qCH₄), а также морского (q(Na)) и континентального (q(D)) были получены когерентными с вариациями параметров орбиты Земли вокруг Солнца (эксцентриситета, угла наклона оси вращения Земли и ее прецессии) и инсоляции с периодами около 100, 40 и 20 тысяч лет в соответствии с теорией Миланковича [18]. При этом отмечено общее запаздывание вариаций содержания в атмосфере радиационно-активных примесей относительно соответствующих температурных вариаций, что, в частности, достаточно четко проявляется для доминирующего в плейстоцене в течение последних сотен тысяч лет цикла, связанного с вариациями эксцентриситета, с периодом около 100 тысяч лет. Эти результаты имеют важнейшее значение для оценки причинно-следственных связей в ЗКС на разных временных горизонтах, в том числе на временах десятков тысяч лет и при быстрых современных процессах.

Существенно, что современная тенденция быстрого глобального потепления, особенно потепления последних десятилетий, объясняемого антропогенными воздействиями, противоположна тенденции существенно более медленного перехода к очерде-

* E-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru

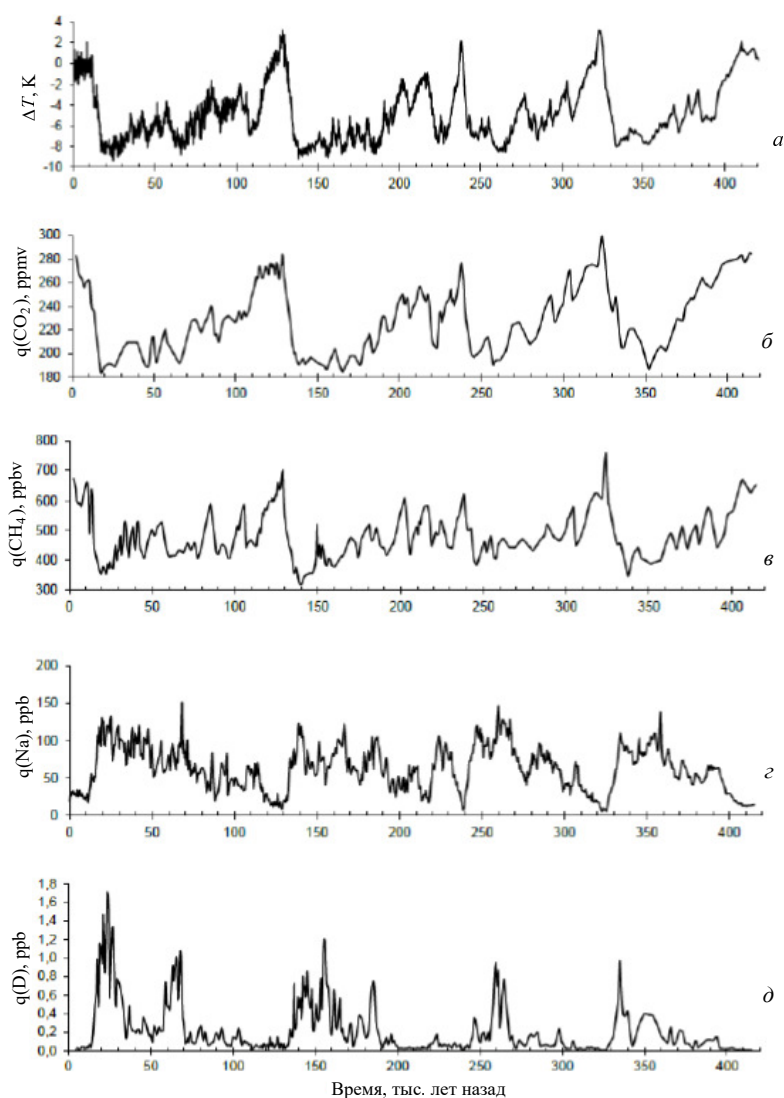


Рис. 1. Вариации температуры ΔT , К (а), содержания углекислого газа $q(\text{CO}_2)$, ppmv (б), метана $q(\text{CH}_4)$, ppbv (в), содержания морского $q(\text{Na})$, ppb (г) и континентального $q(\text{D})$, ppb (д) аэрозолей в течение последних 420 тысяч лет по данным ледовых кернов антарктической станции Восток

ному ледниковому периоду. При этом, согласно палеоданным со станции Восток, период последнего межледниковья — голоцен — самый продолжительный за последние сотни тысяч лет, он длится уже более 11 тысяч лет [13] (см. также [19]).

В принципе, не вдаваясь в детали, наиболее общие закономерности в полученных результатах реконструкций можно свести к упрощенной схеме причинно-следственных связей в земной климатической системе в масштабах тысячелетий аналогично [16]. Вариации инсоляции вследствие изменения параметров орбиты Земли приводят к вариациям температурного режима с изменением атмосферной циркуляции и содержания в атмосфере морского и континентального аэрозолей. При глобальном потеплении с таянием ледовых щитов, увеличением влагосодержания атмосферы и уменьшением перепада температур в тропосфере между экватором и полюсом с общим ослаблением тропосферной цир-

куляции ослабляется и перенос аэрозоля в тропосфере. Процессам похолодания соответствуют противоположные изменения.

Следует отметить, что хотя фазовое запаздывание вариаций одной переменной относительно другой является важной характеристикой земной системы, по нему нельзя однозначно судить о соответствующей причинно-следственной связи [20, 21]. Кроме того, наряду с общим запаздыванием вариаций содержания в атмосфере радиационно-активных примесей относительно соответствующих температурных вариаций, по данным палеоклиматических реконструкций, проявляются временные интервалы с противоположным фазовым сдвигом, в частности для циклов, связанных с вариациями угла наклона оси вращения Земли с периодом около 40 тысяч лет (см., напр., [15–17, 19]).

Исследования на основе данных станции Восток получили в дальнейшем развитие в других соответ-

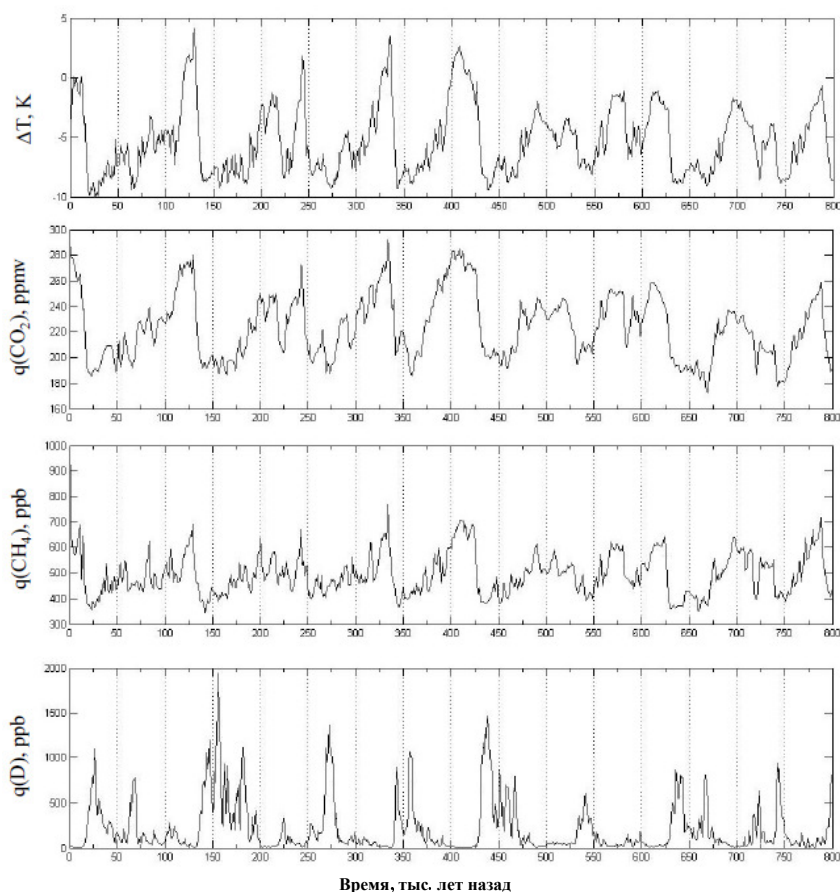


Рис. 2. Вариации температуры ΔT , К, содержания углекислого газа $q(\text{CO}_2)$, ppmv, метана $q(\text{CH}_4)$, ppbv и аэрозоля $q(\text{Dust})$, ppbv в течение последних 800 тысяч лет по данным ледовых кернов, полученных в рамках проекта EPICA

ствующих проектах. Разносторонние исследования проведены с использованием палеоклиматических реконструкций для последних 800 тысяч лет по результатам анализа воздуха в пузырьках ледовых кернов, полученных в рамках международного проекта EPICA (Dome C) [22–27] (см. также [28–30]).

В последние годы было опубликовано много работ, касающихся исследований с палеореконструкциями состава атмосферы на фоне палеоклиматических реконструкций [1, 2]. В том числе проведено много исследований с анализом связи между изменениями температурных вариаций и содержания в атмосфере парниковых газов, по данным антарктической станции Восток и проекта EPICA, с целью определить причинно-следственные связи в глобальных изменениях климата.

В целом по результатам анализа вариаций для рядов данных станции Восток и проекта EPICA проявляется опережение температурными вариациями соответствующих вариаций содержания парниковых газов с периодами около 100 тысяч лет — доминирующего цикла Миланковича в пределах последних 800 тысяч лет. При этом для более короткопериодных вариаций были отмечены противоположные фазовые сдвиги [19, 28]. Подобные особенности взаимных изменений проявляются и для температуры и содержания в атмосфере морского

и континентального аэрозоля по данным антарктической станции Восток и проекта EPICA [29, 30].

В данной работе представлены результаты сравнительного анализа взаимной динамики разнопериодных вариаций температуры и содержания аэрозоля в атмосфере на различных временных интервалах с использованием палеоданных, полученных на российской антарктической станции Восток и в рамках международного антарктического проекта EPICA для последних сотен тысяч лет в пределах плейстоцена (см. также [29, 30]).

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для анализа использовались палеореконструкции для последних 420 тысяч лет по данным ледовых кернов с антарктической станции Восток (78° ю.ш., 106° в.д.) [12] и палеореконструкции для последних 800 тысяч лет по данным, полученным в рамках антарктического проекта EPICA (Dome C, 75° ю.ш., 123° в.д.) [23]. Данные с антарктической станции Восток, представленные на рис. 1, включают данные, характеризующие изменения температуры ΔT , содержания в атмосфере углекислого газа $q(\text{CO}_2)$, метана $q(\text{CH}_4)$, морского аэрозоля $q(\text{Na})$

и континентального аэрозоля (пыли) $q(D)$. Для анализа использовались палеоданные с шагом 500 лет.

Представленные на рис. 2 данные ледовых кернов проекта EPICA включают изменения температуры ΔT и содержания в атмосфере углекислого газа $q(CO_2)$, метана $q(CH_4)$ и аэрозоля $q(D)$. Вариации температуры ΔT оценивались с использованием данных по содержанию дейтерия δD_i во льду и изотопа кислорода $q(\delta^{18}O_{мор})$ в морской воде.

Для исследования вариаций различных переменных и их взаимных изменений применялись методы вейвлетного и кросс-вейвлетного анализа [31]. Этими методами, основанными на вейвлет-преобразованиях, анализируются для двух временных рядов характеристики их взаимосвязи — локальные когерентность и сдвиг фазы (временное запаздывание).

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 представлены интегральные (слева) и локальные (справа) вейвлет-спектры для вариаций температуры ΔT (а), содержания морского $q(Na)$ (б) и континентального (пылевого) $q(D)$ аэрозолей в течение последних 420 тыс. лет по данным ледовых кернов антарктической станции Восток. Соответствующие вейвлет-спектры для вариаций содержания в атмосфере парниковых газов CO_2 ($q(CO_2)$) CH_4 ($q(CH_4)$) по данным ледовых кернов антарктической станции Восток и результаты их анализа представлены, например, в [15–17].

По результатам вейвлетного анализа вариаций температуры ΔT и содержания в атмосфере морского аэрозоля $q(Na)$ и континентального аэрозоля $q(D)$ по палеорекострукциям антарктической станции Восток, представленным на рис. 3, а, б, в, как и для вариаций $q(CO_2)$ и $q(CH_4)$, проявляются циклы Миланковича, связанные с изменением параметров земной орбиты. Для температуры значительно выделяются циклы Миланковича с периодами около 20, 40 и 100 тысяч лет. Для содержания континентального и морского аэрозолей также проявляются эти циклы Миланковича, наиболее значимо выделяется цикл Миланковича, связанный с изменениями эксцентриситета орбиты Земли с периодом около 100 тысяч лет.

При вейвлетном анализе вариаций температуры ΔT и содержания в атмосфере континентального аэрозоля $q(D)$ по данным EPICA, как и для вариаций $q(CO_2)$ и $q(CH_4)$, также проявляются циклы Миланковича, связанные с изменением параметров земной орбиты (рис. 4, а, б). Наиболее значимо выделяется цикл Миланковича, связанный с изменениями эксцентриситета орбиты Земли с периодом около 100 тысяч лет.

На рис. 5 приведены результаты кросс-вейвлетного анализа взаимных изменений ΔT , $q(Na)$ и $q(D)$ по данным ледовых кернов с антарктической станции Восток.

Согласно рис. 5, а когерентность вариаций $q(Na)$ с соответствующими вариациями ΔT значима для

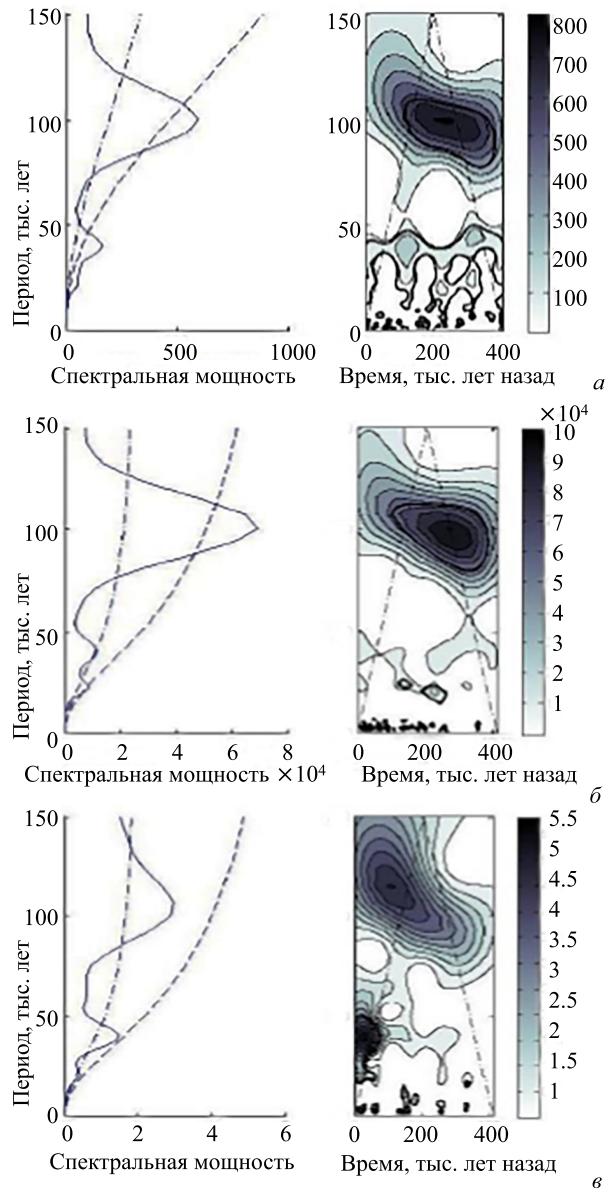


Рис. 3. Интегральные (слева) и локальные (справа) вейвлет-спектры для вариаций температуры ΔT (а), содержания морского $q(Na)$ (б) и континентального $q(D)$ аэрозоля в течение последних 420 тысяч лет по данным ледовых кернов антарктической станции Восток. Штрих-пунктирные линии на локальных спектрах отделяют области с краевыми эффектами, а жирные линии ограничивают области, где мощность сигнала больше, чем для «модели стационарного красного шума» на уровне значимости $p = 0.05$. Штриховые линии на интегральных спектрах характеризуют 95%-й квантиль значений мощности для модели стационарного красного шума, а штрих-пунктирные — ее среднее значение

широкого диапазона периодов — от периодов порядка 100 тысяч лет до периодов менее 10 тысяч лет. Для наиболее значимых долгопериодных вариаций с периодами около 100 тысяч лет проявляется общее отставание вариаций $q(Na)$ от вариаций ΔT . При этом для более короткопериодных вариаций, в том числе для вариаций с периодами около

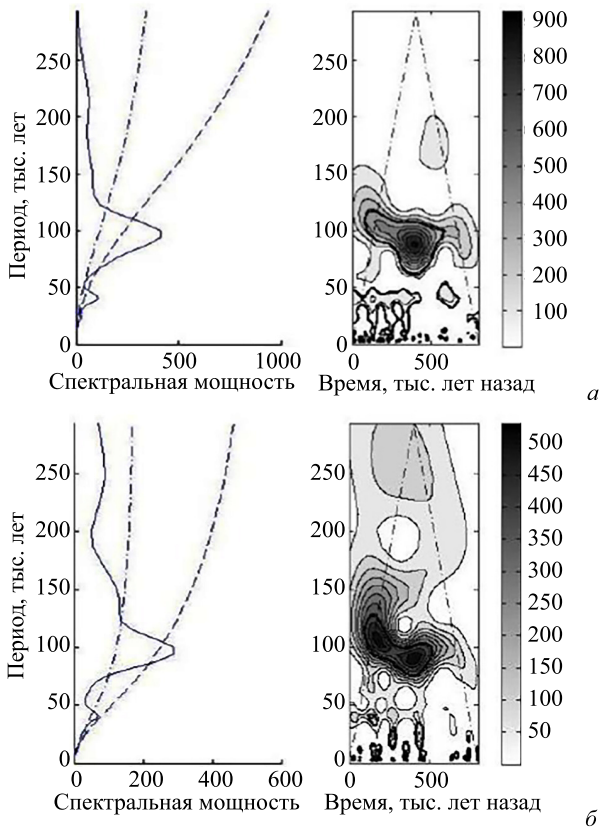


Рис. 4. Интегральные (слева) и локальные (справа) вейвлет-спектры для вариаций температуры ΔT (а), содержания морского $q(\text{Na})$ (б) и континентального $q(\text{D})$ (в) аэрозоля в течение последних 800 тысяч лет по данным ледовых кернов, полученных в рамках проекта EPICA. Штрих-пунктирные линии на локальных спектрах отделяют области с краевыми эффектами, а жирные линии ограничивают области, где мощность сигнала больше, чем для «модели стационарного красного шума» на уровне значимости $p = 0.05$. Штриховые линии на интегральных спектрах характеризуют 95%-й квантиль значений мощности для модели стационарного красного шума, а штрих-пунктирные — ее среднее значение

40 тысяч лет, отмечены интервалы с противоположным фазовым сдвигом, в частности около 400 тысяч лет назад.

Когерентность вариаций содержания в атмосфере пылевого аэрозоля $q(\text{D})$ с вариациями ΔT по данным станции Восток значима для менее широкого диапазона периодов, чем когерентность вариаций $q(\text{Na})$ (рис. 5, б). При этом вариации $q(\text{D})$ с периодами около 100 тысяч лет отстают от соответствующих вариаций ΔT больше, чем вариации $q(\text{Na})$.

В дополнение к рис. 5 на рис. 6 представлены выделенные ключевые 41-тысячелетние (а) и 100-тысячелетние (б) моды для температурных вариаций и содержания в атмосфере морского и континентального аэрозолей по данным ледовых кернов с антарктической станции Восток. Согласно рис. 6, б 100-тысячелетние вариации $q(\text{D})$ в целом запаздывают по фазе относительно соответствующих вариаций ΔT . Для 41-тысячелетних ва-

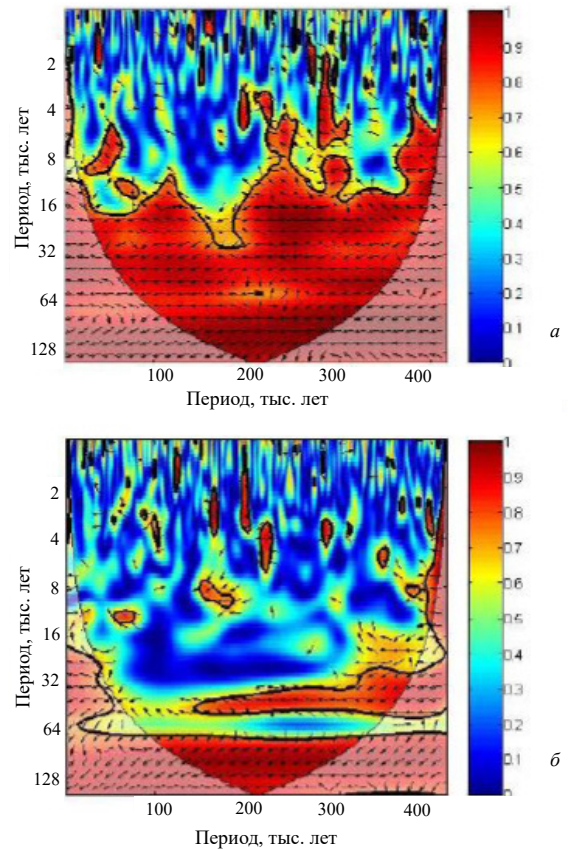


Рис. 5. Локальная когерентность ΔT и $q(\text{Na})$ (а), а также ΔT и $q(\text{D})$ (б) по данным ледовых кернов с антарктической станции Восток. Сплошные линии отделяют области влияния краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области с когерентностью, значимой на уровне $p = 0.05$. Стрелки, указывающие вправо, характеризуют синфазные изменения разных переменных, влево — противофазные

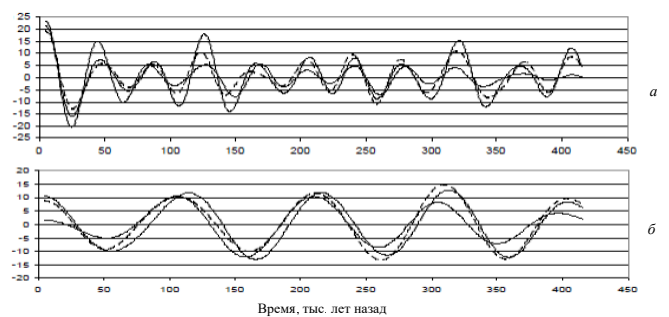


Рис. 6. Ключевые, 41-тысячелетние (а) и 100-тысячелетние (б) моды для температурных вариаций ΔT (толстые кривые) и вариаций содержания в атмосфере морского ($-q(\text{Na})$) (пунктирные линии) и континентального аэрозоля ($-60q(\text{D})$) (тонкие линии) по данным ледовых кернов с антарктической станции Восток

риаций в течение 420 тысяч лет, наряду с временными интервалами с запаздыванием по фазе вариаций, содержания в атмосфере аэрозоля относительно температурных вариаций проявляются интерва-

лы с противоположными сдвигами по фазе.

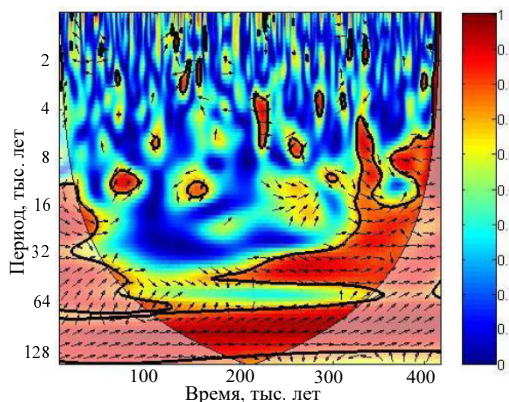


Рис. 7. Локальная когерентность $q(\text{Na})$ и $q(\text{D})$ по данным ледовых кернов с антарктической станции Восток. Сплошные линии отделяют области влияния краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области с когерентностью, значимой на уровне $p = 0.05$. Стрелки, указывающие вправо, характеризуют синфазные изменения разных переменных, влево — противофазные

Рис. 7 характеризует локальную когерентность $q(\text{Na})$ и $q(\text{D})$ по данным ледовых кернов с антарктической станции Восток. Согласно рис. 7 когерентность вариаций $q(\text{Na})$ и $q(\text{D})$ с периодами около 100 тысяч лет, связанных с изменением эксцентриситета орбиты Земли вокруг Солнца, устойчиво значима для всего анализируемого периода. При этом проявляется общее запаздывание по фазе вариаций $q(\text{D})$ относительно вариаций $q(\text{Na})$. Отмечена также значимая когерентность связанных с изменением угла наклона оси вращения Земли вариаций $q(\text{Na})$ и $q(\text{D})$ с периодами около 40 тысяч лет с общим запаздыванием вариаций $q(\text{D})$ относительно вариаций $q(\text{Na})$. Наряду с этим, для временного интервала в пределах примерно 100–200 тысяч лет назад на фоне более слабой когерентности $q(\text{Na})$ и $q(\text{D})$ проявляется запаздывание вариаций $q(\text{Na})$ относительно вариаций $q(\text{D})$.

Результаты кросс-вейвлетного анализа вариаций температуры ΔT и содержания в атмосфере континентального аэрозоля (пыли) $q(\text{D})$ по данным проекта EPICA на рис. 8 выявляют их значимую когерентность в достаточно широком диапазоне периодов. В течение всего анализируемого 800-тысячелетнего временного интервала значимо проявляется когерентность для вариаций с периодом около 100 тысяч лет, связанных с изменением эксцентриситета орбиты Земли вокруг Солнца. Значимо проявляется также когерентность для вариаций ΔT и $q(\text{D})$ с периодами около 40 тысяч лет, связанных с изменением угла наклона оси вращения Земли. Стоит отметить качественное отличие когерентности и фазовых сдвигов вариаций температуры и содержания аэрозоля для последних 400 тысяч лет и для предыдущего временного интервала. В частности, для последних 400 тысячелетий более значимо проявляется когерентность вариаций ΔT и $q(\text{D})$

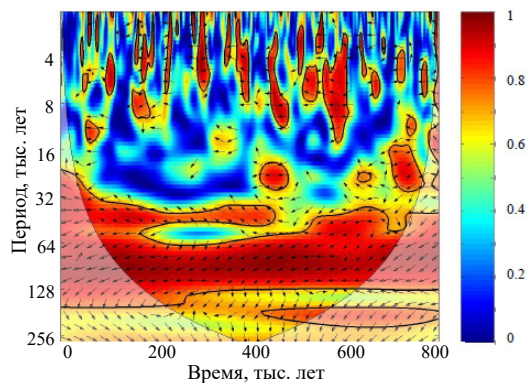


Рис. 8. Локальная когерентность ΔT и $q(\text{D})$ по данным ледовых кернов, полученных в рамках проекта EPICA. Сплошные линии отделяют области влияния краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области с когерентностью, значимой на уровне $p = 0.05$. Стрелки, указывающие вправо, характеризуют синфазные изменения разных переменных, влево — противофазные

с периодами около 40 тысяч лет, при этом вариации $q(\text{D})$ опережают вариации ΔT .

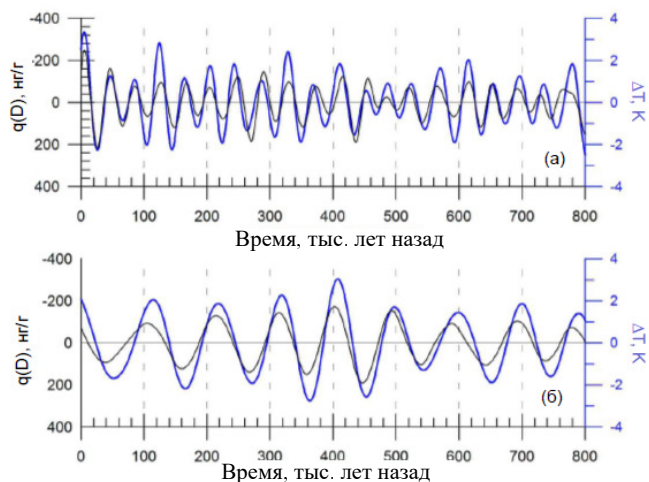


Рис. 9. Ключевые 41-тысячелетние (а) и 100-тысячелетние (б) моды для температурных вариаций (ΔT) (синие кривые) и вариаций содержания в атмосфере континентального аэрозоля ($q(\text{D})$) (черные линии) аэрозоля по данным ледовых кернов, полученных в рамках проекта EPICA

В дополнение к рис. 8 на рис. 9 представлены выделенные ключевые 41-тысячелетние (а) и 100-тысячелетние (б) моды для температурных вариаций и содержания в атмосфере континентального аэрозоля по данным ледовых кернов, полученных в рамках международного проекта EPICA. Особенности фазовых сдвигов, отмеченные на рис. 8, более явно проявляются на рис. 9 для отдельных мод. На рис. 9, б достаточно четко проявляется общее запаздывание по фазе 100-тысячелетних вариаций $q(\text{D})$ относительно соответствующих вариаций ΔT . Для 41-тысячелетних вариаций в течение 800 тысяч лет, наряду с временными ин-

тервалами с запаздыванием по фазе вариаций $q(D)$ относительно вариаций ΔT , проявляются интервалы с противоположными сдвигами по фазе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты кросс-вейвлетного анализа по палеоданным с антарктической станции Восток и международного проекта EPICA выявляют общее запаздывание вариаций содержания в атмосфере аэрозоля (как и вариаций содержания в атмосфере парниковых газов — углекислого газа и метана) относительно температурных вариаций ΔT в доминирующих в пределах последнего миллиона лет ледниковых циклах, связанных с изменением эксцентриситета орбиты Земли вокруг Солнца с периодами около 100 тысяч лет. Наряду с этим, для более короткопериодных ледниковых циклов на отдельных временных интервалах проявляются противоположные эффекты с запаздыванием температурных вариаций относительно вариаций содержания аэрозоля в атмосфере. В том числе эффект запаздывания температурных вариаций относительно вариаций содержания в атмосфере аэрозоля (как и относительно вариаций содержания в атмосфере парниковых газов, в частности относительно вариаций

содержания в атмосфере метана) проявляется для мод с периодами около 40 тысяч лет, связанных с изменениями угла наклона оси вращения Земли.

Отмеченные особенности взаимных изменений климатических характеристик (температурного режима) и содержания в атмосфере радиационно-активных примесей — не только парниковых газов, но и аэрозольных составляющих — имеют существенное значение как для диагностики причинно-следственных связей в земной системе, так и для тестирования результатов модельных палеоклиматических расчетов [32–37]. При этом необходимо учитывать, что хотя отмеченные фазовые сдвиги являются важными характеристиками динамики земной системы, по ним нельзя однозначно судить о соответствующих причинно-следственных связях. Существенное развитие с детализацией результатов соответствующих палеоклиматических исследований возможно при наличии данных для более длительных периодов, включающих переход в середине плейстоцена от доминирования в ледниковых циклах вариаций с периодами около 40 тысяч лет к доминированию вариаций с периодами около 100 тысяч лет.

Представленные результаты соответствуют тематике проекта РНФ № 19-17-00240.

- [1] Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker et al. (eds.). Cambridge Univ. Press. 2013.
- [2] Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte et al. (eds.). Cambridge Univ. Press. 2021.
- [3] Мохов И.И. // Вестник РАН. **92**, № 1. 3. (2022).
- [4] Барков Н.И. // Материалы гляциологических исследований. № 22. 77. (1973).
- [5] Барков Н.И., Гордиенко Ф.Г., Короткевич Е.С., Котляков В.М. // Доклады АН. **214**, № 6. 1382. (1974).
- [6] Барков Н.И., Гордиенко Ф.Г., Короткевич Е.С., Котляков В.М. // Доклады АН. **230**, № 3. (1976).
- [7] Барков Н.И., Липенков В.Я. // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 69. (1995).
- [8] Барков Н.И., Вострецов Р.Н., Липенков В.Я., Саламатин А.Н. // Арктика и Антарктика. Вып.1(35). 82. (2002).
- [9] Барков Н.И. // Лед и снег. № 4(120). 9. (2012).
- [10] Gaudichet A., De Angelis M., Lefevre R. et al. // *Geophys. Res. Lett.* **15**(13). 1471. (1988).
- [11] Raynaud D., Chappellaz J., Barnola J.M. et al. // *Nature*. **333**. 655. (1988).
- [12] Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al. // *Nature*. **399**. 429. (1999).
- [13] Котляков В.М., Лориус К. // Изв. АН. Сер. геогр. N 1. 7. (2000).
- [14] Липенков В.Я., Барков Н.И., Саламатин А.Н. // Проблемы Арктики и Антарктики. (2000). Вып. 72.
- [15] Mokhov I.I., Bezverkhny V.A., Karpenko A.A. // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. H. Ritchie (ed.). Rep. No. 32. WMO/TD-No.1105. 2.17-2.18. (2002).
- [16] Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. // Материалы гляциологических исследований. **95**. 3. (2003).
- [17] Mokhov I.I., Bezverkhny V.A., Karpenko A.A. // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. J. Cote (ed.). Geneva: World Meteorological Organization. 7. 31. (2004).
- [18] Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.-Л.: ГОНТИ, 1939.
- [19] Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. **41**. № 5. 579. (2005).
- [20] Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Тимажев А.В. // Докл. РАН. 463. № 6. 708. (2015).
- [21] Muryshev K.E., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Timazhev A.V. // *Glob. Planet. Change*. **148**. 29. (2017).
- [22] Basile I., Grousset F.E., Revel M. et al. // *Earth Planet. Sci. Lett.* **146**. 573. (1997).
- [23] EPICA community members // *Nature*. **429**. 623. (2004).
- [24] Bigler M. et al. // *J. Geophys. Res.* **111**. D08205. (2006).
- [25] Wolff E.W. et al. // *Nature*. **440**. 491. (2006).
- [26] Delmonte B., Andersson S., Hansson M. et al. // *Geophys. Res. Lett.* **35**. L07703. (2008).
- [27] Lambert F., Delmonte B., Petit J.R. et al. // *Nature*. **452**. 616. (2008).
- [28] Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. / В: Экстремальные природные явления и катастрофы.

- Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. Отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2010. сс. 312-319.
- [29] *Мохов И.И., Безверхний В.А., Ларкина И.С.* // Междунар. конф. «Аэрозоль и оптика атмосферы». Тезисы докладов. ИФА РАН. 55. (2014).
- [30] *Mokhov I.I., Bezverkhny V.A., Larkina I.S.* // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. E. Astakhova (ed.). 2015. WCRP Rep. No.12/2015. S. 2. 4–5.
- [31] *Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S.* // *Nonlinear Processes in Geophysics*. **11**. 561. (2004).
- [32] *Peltier W.R., Marshall S.* // *J. Geophys. Res. Atmos.* **100** (D7). 14269. (1995). <https://doi.org/>
- [33] *Petit J.R., Delmotte M.* // *Tellus*. **61B**. 768. (2009).
- [34] *Мохов И.И., Величко А.А., Демченко П.Ф.* и др. / В: Атлас-монография: Развитие ландшафтов и климата Северной Евразии. Поздний плейстоцен–голоцен–элементы прогноза. Ретроспективный анализ и сценарии. Выпуск III. Под ред. А.А. Величко. М.: ГЕО, 2010. Гл. 6. сс. 87-104.
- [35] *Ganopolski A., Calov R., Claussen M.* // *Clim. Past*. **6**. 229. (2010).
- [36] *Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н.* и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. **55**, № 3. 11. (2019).
- [37] *Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И.* и др. // Доклады РАН. Науки о Земле. **501**, № 1. 52. (2021).

Mutual Changes in Temperature and Aerosol Content in the Atmosphere Based on Antarctic Ice Core Data for the Last 800 000 Years

I.I. Mokhov^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Department of Atmospheric Physics
Moscow, 119991, Russia*

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, 119017, Russia
E-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru*

A comparative analysis of mutual changes in temperature and aerosol content in the atmosphere was carried out based on Antarctic ice core data obtained from the Russian station Vostok and the international EPICA project for the last 800 000 years. According to the results of cross-wavelet analysis for the last hundreds of thousands of years, variations in aerosol content in the atmosphere, as well as variations in the content of greenhouse gases CO₂ and CH₄, generally lag behind temperature changes for dominant glacial cycles within the last million years, with periods of approximately 100 000 years, associated with changes in the Earth's orbit eccentricity around the Sun. For shorter-period glacial cycles, opposite effects with a lag of temperature variations relative to variations in radiatively-active components, including marine and continental aerosols, are manifested on separate time intervals. In particular, the lag of temperature variations relative to variations in aerosol content in the atmosphere (as well as relative to variations in methane content) is observed for the modes associated with obliquity changes in the Earth's rotation axis with periods of approximately 40 000 years.

PACS: 92.60.Ry.

Keywords: paleoclimatic reconstructions, Antarctic ice cores, Vostok station, EPICA, temperature changes/variations, radiatively-active atmospheric components, marine and continental (dust) aerosol.

Received 01 March 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 3. Pp. 416–423.

Сведения об авторе

Мохов Игорь Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, академик РАН, зав. кафедрой физики атмосферы физического факультета МГУ, научный руководитель ИФА им. А.М. Обухова РАН; тел.: (495) 939-38-06, (495) 951-55-65, e-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru, mokhov@ifaran.ru.