

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 581.5+581.134.5: 581.824+582.475+551.510.534

О возможном влиянии Североатлантического колебания на жизнедеятельность деревьев (юго-восток Западной Сибири)

Б.Г. Агеев¹, В.А. Сапожникова^{✉1}, А.Н. Груздев², Д.А. Савчук^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 15.04.2024;

после доработки 19.06.2024;

принята к печати 20.06.2024

Реакция лесных экосистем на меняющиеся климатические условия является темой многих исследований. В настоящей работе через климатические параметры выяснялось влияние Североатлантического колебания (САК) на некоторые виды деревьев, произрастающие в районе г. Томска (юго-восток Западной Сибири). С использованием лазерного оптико-акустического газоанализатора получены хронологии газовых проб CO_2 , $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$, извлеченных под вакуумом из колец спилов ряда хвойных и лиственных деревьев. Анализ хронологии САК, полученных газовых хронологий и климатических параметров показал следующее: 1) температура воздуха в районе г. Томска значимо коррелирует с индексом САК; 2) кросс-спектральный анализ хронологий газовых составляющих спилов лиственных деревьев с температурой воздуха за вегетационный период указывает на наличие когерентных колебаний в области четырехлетнего цикла; 3) обнаружено непосредственное влияние САК на параметры деревьев: найдены коэффициенты корреляции индекса САК с хронологиями CO_2 , $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ и шириной колец шести спилов деревьев (из восьми). Сделан вывод, что САК может влиять на жизнедеятельность некоторых видов деревьев лесов Сибири (на четырехлетнем временном масштабе). Результаты работы могут быть использованы при изучении биосферно-атмосферных процессов для учета влияния на лесные экосистемы удаленных источников вариации атмосферного давления.

Ключевые слова: Североатлантическое колебание, CO_2 , $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$, годовые кольца, цикличность; North Atlantic Oscillation, CO_2 , $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$, tree rings, cyclicity.

Введение

Лесные экосистемы оказывают значительное влияние на состав атмосферы. Газообмен системы «лес–атмосфера» изменяет концентрацию таких атмосферных газов, как CO_2 , CH_4 , CO , SO_2 , NO_x и O_3 [1]. Кроме того леса играют значительную роль в водном балансе: примерно две трети годового количества осадков в бореальных лесах возвращается в атмосферу при транспирации [1]. Бореальные леса, занимающие около 10% суши, поставляют в атмосферу ряд летучих веществ, которые являются основными предшественниками органического аэрозоля [1]. Резкое изменение климатических условий в последнее время может иметь существен-

ные последствия для лесных систем. Бореальные леса — одна из экосистем, где уже наблюдаются биофизиологические изменения, связанные с климатом. Влияние изменяющихся климатических условий на состояние лесов постоянно изучается [2].

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию адаптации растений к меняющимся внешним условиям, вопрос оценки совместного действия природных и антропогенных факторов остается дискуссионным. Считается, что наиболее объективным показателем реакции растений на изменение внешних условий является их CO_2 -газообмен, который доступен для непрерывных измерений [3]. Методики исследования хронологий остаточных газов CO_2 , $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ в кольцах спилов деревьев, используемые нами, дают возможность проследить погодичное воздействие внешних факторов на динамику выделения CO_2 деревьями и проанализировать особенность их циклических характеристик.

* Борис Григорьевич Агеев (ageev@iao.ru); Валерия Александровна Сапожникова (sapo@iao.ru); Александр Николаевич Груздев (a.n.gruzdev@mail.ru); Дмитрий Анатольевич Савчук (savchuk@imces.ru).

Изучение влияния одного из внешних факторов — Североатлантического колебания (САК) — на древесную растительность Европы показало, что вариации ширины колец деревьев пихты на обширной территории от Чехии до Италии зависят от колебаний САК [4]. Такой же эффект зафиксирован и в Азии: выявлена корреляция индекса САК и изменений ледово-термических процессов оз. Байкал в XX в. [5]. Хотя природа САК до конца не изучена [6], известно, что дальние связи активно влияют на циркуляционные процессы в атмосфере и вполне возможно, что САК могло оставить свой след в жизнедеятельности сибирских лесов.

Цель настоящей работы — выяснить, существует ли корреляционная связь между индексами САК и хронологиями CO_2 , $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ в спилах деревьев как элементов лесов Западной Сибири. Выбраны следующие виды деревьев: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), сибирский кедр (*Pinus sibirica* Du Tour), береза повислая (*Betula pendula* Roth), осина (*Populus tremula* L.), черемуха обыкновенная (*Prunus padus* L.), ива белая (*Salix alba* L.), липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.). Выбор обусловлен тем фактом, что данные виды выполняют значимые экологические функции в лесных экосистемах, а большинство из них являются основными лесообразующими породами бореального и умеренного поясов России.

Материалы и методы

Исследования проводились с использованием спилов стволов деревьев, произрастающих в районе г. Томска (56°30' с.ш., 84°58' в.д.) и вокруг него (юго-восток Западной Сибири). Спилов ивы, березы и липы брались в черте города, черемухи — в пригороде (Академгородок), осины — в лесном массиве (41 км от г. Томска). Число колец лиственных деревьев варьировалось от 23 до 40. Кедр сибирский произрастал в припоселковом кедровнике д. Трубачево (4 км от г. Томска), исследуемый ряд составлял 100 колец. Спилов сосны были взяты в Тимирязевском бору в 10–15 км к западу от Томска (юг Томской области). У деревьев, упавших после ветровала в 2015 г., число колец варьировалось от 43 до 49. Данные по содержанию остаточных газов в древесине колец ранее подробно описывались в литературе [7, 8].

Для исследования газовых компонент, десорбированных под вакуумом, использовался компьютеризированный оптико-акустический лазерный газоанализатор с перестраиваемым волноводным CO_2 -лазером (предельная чувствительность $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ при мощности $W = 70 \text{ мВт}$). Ширина годичных колец на спилах измерялась на полуавтоматическом комплексе LINTAB с точностью 0,01 мм. В работе также использовались данные измерений приземной температуры воздуха и суммы осадков на государственной метеостанции Томска (синоптический индекс ВМО 29430).

Для кросс-спектрального анализа применялся метод максимальной энтропии [9], в остальных случаях спектральный анализ производился с помощью пакета программ ORIGIN.

В работе использовались среднемесячные значения индекса САК за 1950–2023 гг. [10]. Индекс САК определялся как разность нормированных аномалий приземного давления между ст. Понта-Делгада (Азорские острова) и Акурейри (Исландия) в Северной Атлантике [6].

Результаты и обсуждение

Связь САК с рядом параметров

На рис. 1 приведены результаты спектрального анализа изменчивости индексов САК (тренд удален). Рис. 1, *а* представляет спектр индекса САК, осредненного по 12 месяцам, за 1951–2023 гг. Поскольку считается, что именно в холодный период синхронизация между центрами действия атмосферы наиболее выражена [11], то рис. 1, *б* иллюстрирует спектр индекса САК, осредненного по четырем зимним месяцам (декабрь прошлого года — март текущего). В это время деревья находятся в периоде покоя и не растут. На рис. 1, *в* представлен спектр индекса, осредненного по пятимесячным периодам с мая по сентябрь, т.е. охватывающим время вегетации деревьев. Спектры указывают на наличие в САК квазидвухлетней цикличности и вариаций, близких к четырехлетней.

Для оценки влияния САК на синоптические процессы в окрестности Томска был выполнен корреляционный анализ между метеоданными (температурой и осадками) в Томске и параметрами САК (корреляционные диаграммы САК). На рис. 2 приведены результаты анализа. Корреляция средних по четырем зимним месяцам температур для Томска с индексом САК оказалась статистически высокозначимой: коэффициент корреляции $R = 0,63$, число данных (экспериментально изученных колец) $N = 73$, уровень значимости $P < 0,0001$ (рис. 2, *а*). Корреляция между осадками и индексом САК также существует (рис. 2, *б*), при этом коэффициент корреляции характеризуется приемлемой границей статистической значимости ($R = 0,26$, $N = 73$, $P = 0,024$). Однако высокая значимость коэффициента корреляции температур с индексами САК, видимо, уже может свидетельствовать о влиянии САК на наш регион.

О влиянии температуры и осадков на хронологию газовых компонент хвойных деревьев уже говорилось ранее [12]. Мы обнаружили корреляцию между индексом САК и параметрами жизнедеятельности деревьев — хронологиями CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$. Коэффициенты корреляции приведены в таблице.

Для спилов ивы и липы корреляция с индексами САК не обнаружена. Таким образом, ряд параметров шести деревьев из восьми указывает на возможную связь содержаний остаточных газов с САК.

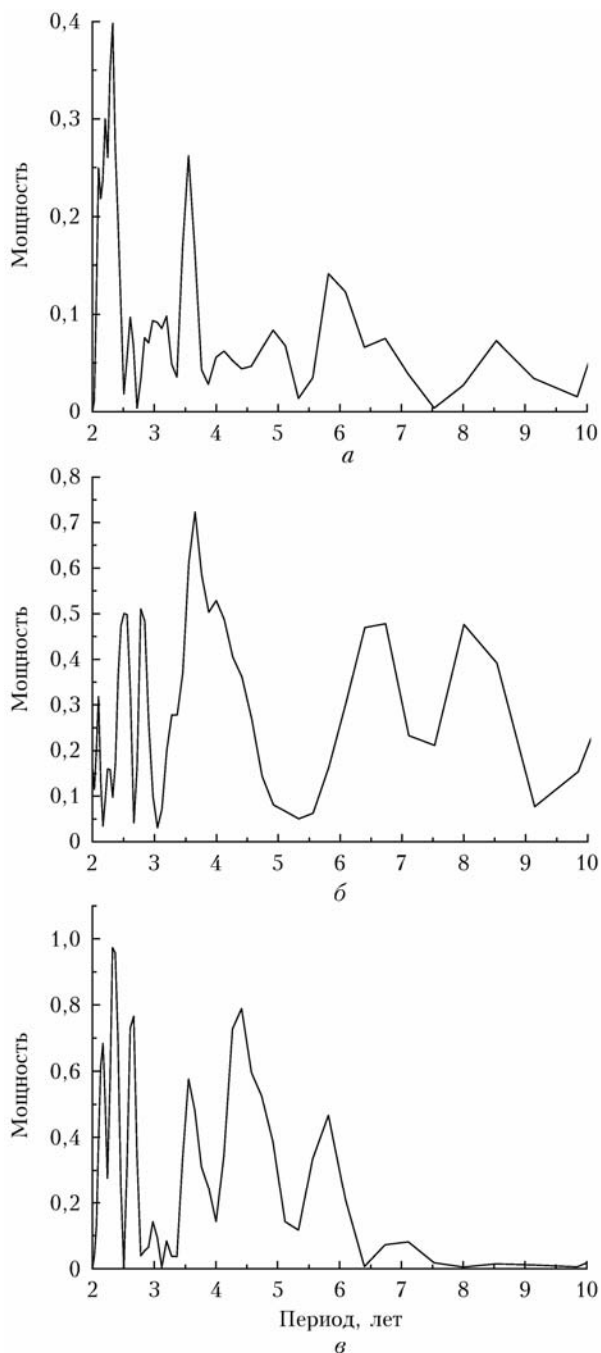


Рис. 1. Результат спектрального анализа индекса САК (1951–2023 гг.), осредненного: за 12 месяцев (а); за 4 зимних месяца (с декабря прошлого года по март текущего) (б); за вегетационный период (с мая по сентябрь текущего года) (в)

Спектры кросс-корреляции

С учетом связи хронологий температуры в Томске с индексом САК был выполнен кросс-спектральный анализ данных для лиственных деревьев с температурой (за период вегетации) (рис. 3). Для хвойных деревьев подобный анализ был выполнен ранее в [12].

На всех фрагментах рис. 3 есть пик в районе четырехлетнего периода с высокой когерентностью.

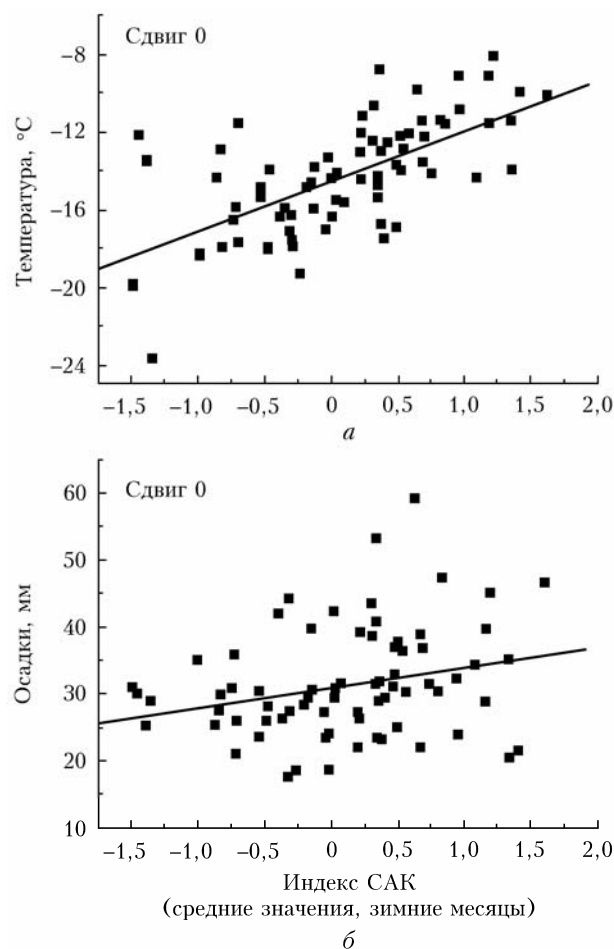


Рис. 2. Корреляционные диаграммы средних по четырем зимним месяцам температур (а) и сумм осадков (б) в г. Томске с индексом САК

Фазовую задержку на четырехлетнем периоде, соответствующем максимуму когерентности, можно приблизительно считать близкой к нулю (ноль и 2π — это одно и то же). Иными словами, четырехлетние вариации CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ происходят примерно в фазе с четырехлетними вариациями средней температуры за вегетационный период.

Четырехлетние циклы

На существование колебаний с периодом, близким к четырем годам, исследователи обращали внимание очень давно. Например, такие колебания фиксировались в хронологиях осадков в городах Филадельфия и Балтимор в 1820–1960 гг. [13]. Цикл 3,9–4,4 года отмечен во многих дендрохронологических рядах, некоторых природных процессах и возникал, как полагали, в результате действия приливообразующих сил Луны и Солнца [14]. Существует точка зрения, что циклы с периодами 2, 3 или 4 года связаны с автоколебательными процессами в системе «океан–атмосфера» [15]. Возможно также, что причина таких колебаний связана с процессами, протекающими в Земле: 8,5-летний ритм обнаружен у внутреннего ядра нашей планеты [16].

Корреляция хронологий CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ с индексами САК

Спил	$\text{CO}_2 - \text{САК}$		$(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) - \text{САК}$		Ширина кольца – САК		$\text{CO}_2 - \text{САК1}$		$(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) - \text{САК1}$		Ширина кольца – САК1		N
	R	Δ	R	Δ	R	Δ	R	Δ	R	Δ	R	Δ	
1. Кедр (131, Трубачево)	0,5	0	нз		0,31	0	нз		нз		нз		44
2. Лиственница 300	нз		нз		-0,33 -0,40	0 1	-0,33	0	нз		нз		58
3. Сосна «лес1»	0,43	3	0,32	3	нз		нз		нз		нз		39
4. Сосна «лес2»	нз		нз		нз		0,34	5	0,37	2	0,47 0,50	1 3	33
5. Осина	нз		0,46	2	нз		-0,39	2	-0,41 0,37	2 4	нз		39
6. Черемуха	0,6	1	нз		-0,4	0	нз		нз		нз		27

Примечание. $P = 0,01-0,05$; Δ – сдвиг, годы. Индекс САК – среднее по четырем зимним месяцам (декабрь прошлого года + январь + февраль + март); САК1 – среднее за пять месяцев (май–сентябрь, период вегетации); «нз» – корреляция статистически незначима.

Природа четырехлетних колебаний в хронологиях газовых компонентов хвойных деревьев и возможные механизмы их связи с четырехлетними вариациями температуры и осадков уже были рассмотрены нами ранее [12]. Как иллюстрацию стабильности пове-

дения четырехлетнего цикла в погодичных вариациях CO_2 и H_2O в древесине колец приведем скользящие спектры для газовых компонент в годичных кольцах кедра, росшего в д. Трубачево (10 км к юго-востоку от г. Томска) за 1900–1980 гг. (рис. 4).

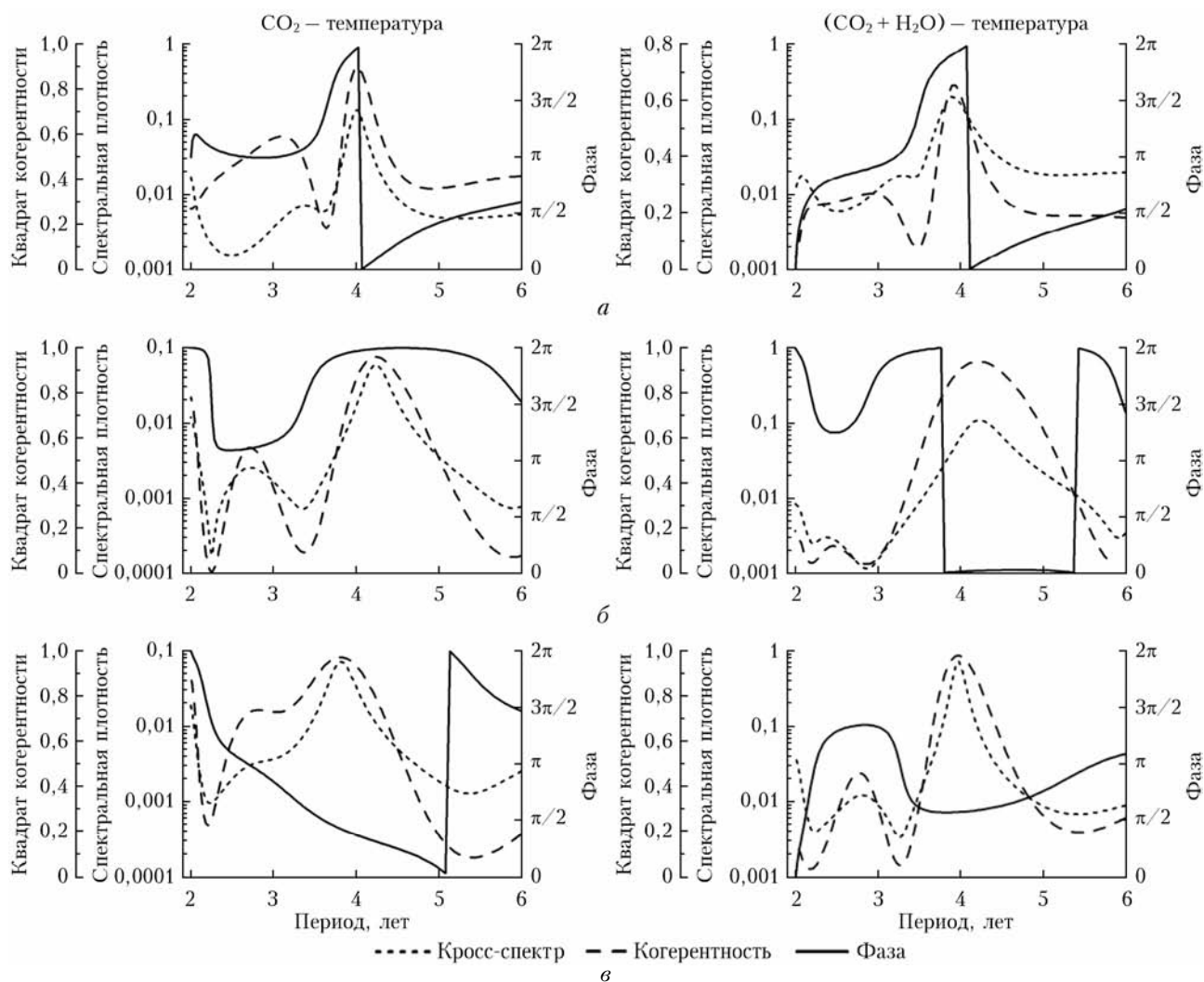
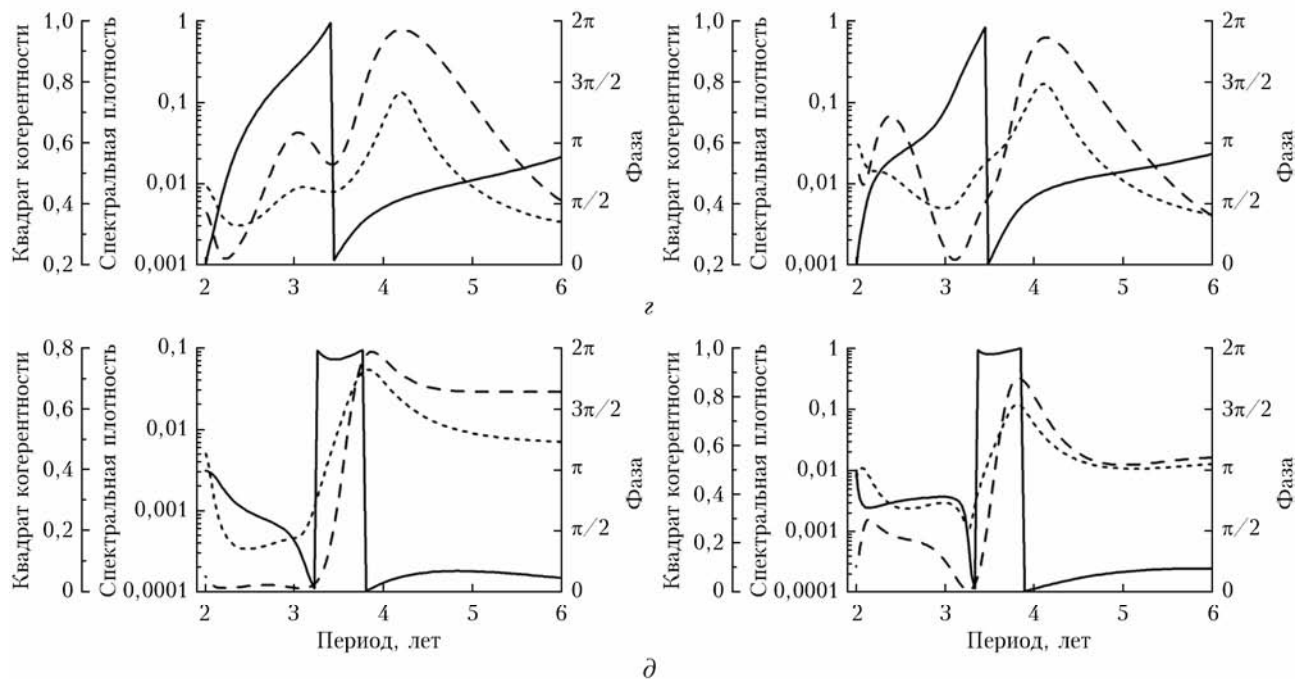


Рис. 3. Кросс-спектры хронологий CO_2 и $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ с температурой (за вегетационный период) для спилов лиственных деревьев: а – береза; б – черемуха; в – ива; г – липа; д – осина (окончание см. на с. 5)



Окончание рис. 3 (начало см. на с. 4)

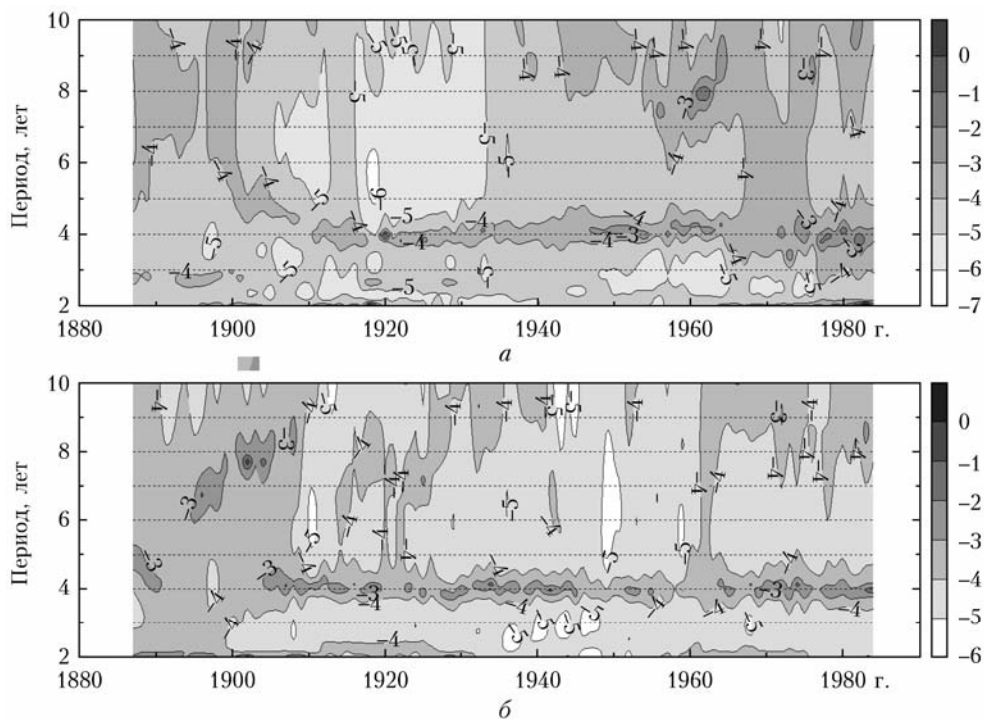


Рис. 4. Скользящий спектр содержания CO_2 (а) и H_2O (б) в годовых кольцах кедра у д. Трубачево (10 км к юго-востоку от г. Томска). Единицами цветовой шкалы являются десятичные логарифмы спектральной плотности температур ($^{\circ}\text{C}^2/\text{год}$) (а) и осадков ($\text{мм}^2/\text{год}$) (б)

Они показывают, что дерево росло в стабильных климатических условиях, цикл не прерывался и не менялся долгое время. Интерес к влиянию эффекта САК не ослабевает уже более столетия [6] из-за возможного длительного воздействия этого колебания на погоду, климат и леса обширной территории.

Закключение

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы: 1) температура воздуха в районе г. Томска значимо коррелирует с индексом Северо-атлантического колебания, в котором присутствуют

вариации в окрестности четырехлетнего периода; 2) кросс-спектральный анализ хронологий CO_2 , ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) колец спилов лиственных деревьев с температурой воздуха за вегетационный период указывает на наличие согласованных (когерентных) колебаний в окрестности четырехлетнего периода; 3) коэффициенты корреляции индекса Северо-атлантического колебания с хронологиями CO_2 , ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) спилов восьми деревьев указывают на наличие корреляционной связи между ними в шести спилах с индексом САК.

Таким образом, можно предположить, что Североатлантическое колебание через температуру и осадки оказывает влияние на жизнедеятельность некоторых видов деревьев лесов Сибири на четырехлетнем временном масштабе.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание ИОА СО РАН, регистрационный номер проекта FWRU-2021-0009, 121031500340-6; ИМКЭС СО РАН, регистрационный номер проекта FWRG-2021-0003, 121031300226-5).

Список литературы

1. Artaxo P., Hansson H.-C., Andreae M.O., Bäck J., Alves E.G., Barbosa H.M.J., Bender F., Bourtsoukidis E., Carbone S., Chi J., Decesari S., Després V.R., Ditas F., Ezhova E., Fuzzi S., Hasselquist N.J., Heintzenberg J., Holanda B.A., Guenther A., Hakola H., Heikkinen L., Kerminen V.-M., Kontkanen J., Krejci R., Kulmala M., Lavić J.V., de Leeuw G., Lehtipalo K., Machado L.A.T., McFiggans G., Franco M.A.M., Meller B.B., Morais F.G., Mohr C., Morgan W., Nilsson M.B., Peichl M., Petäjä T., Praß M., Pöhlker C., Pöhlker M.L., Pöschl U., Von Randow C., Riipine I., Rinne J., Rizzo L., Rosenfeld D., Silva Dias M.A.F., Sogacheva L., Stier P., Swietlicki E., Sörgel M., Tunved P., Virkkula A., Wang J., Weber B., Maria Y.-S., Ana Zieger P., Mikhailov E., Smith J.N., Kesselmeier J. Tropical and boreal forest – atmosphere interactions: A review // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2022. V. 74. P. 24–63. DOI: 10.16993/tellusb.34.
2. IPCC, 2023: Summary for Policymakers // *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. P. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
3. *Леса Европейской территории России в условиях меняющегося климата* / под ред. А.В. Ольчева. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2017. 276 с.
4. Šimůnek V., Prokšpuková A., Vacek Z., Vacek S., Cukor J., Remes J., Hájek V., D'Andrea G., Šálek M., Nola P., Pericolo O., Holzbachová Š., Ripullone F. Silver fir tree-ring fluctuations decrease from north to south latitude – total solar irradiance and NAO are indicated as the main influencing factors // *Forest Ecosyst.* 2023. V. 10. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.fecs.2023.100150
5. Шимараев М.Н. Циркуляционные факторы изменений ледово-термического режима Байкала // *География и природные ресурсы.* 2007. № 4. С. 54–60.
6. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада Лтд, 2013. 144 с.
7. Ageev B.G., Sapozhnikova V.A., Gruzdev A.N., Golovatskaya E.A., Dukarev E.A., Savchuk D.A. Сравнение характеристик остаточных газов в годичных кольцах деревьев сосны // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 2. С. 105–113. DOI: 10.15372/AOO20190203; Ageev B.G., Sapozhnikova V.A., Gruzdev A.N., Golovatskaya E.A., Dukarev E.A., Savchuk D.A. Comparison of residual gas characteristics in annual rings of scots pine trees // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 3. P. 275–283.
8. Ageev B., Ponomarev Yu., Sapozhnikova V., Savchuk D. A laser photoacoustic analysis of residual CO_2 and H_2O in larch stems // *Biosensors.* 2015. V. 5, N 1. P. 1–12. DOI: 10.3390/bios5010001.
9. Kay S.M., Marple S.M. Spectrum analysis – a modern perspective // *Proc. IEEE.* 1961. V. 69, N 11. P. 1380–1419. DOI: 10.1109/PROC.1981.12184.
10. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/nao/>
11. Рыбак Е.А., Рыбак О.О. О спектральной структуре североатлантического колебания // *Метеорол. и гид-рол.* 2005. № 3. С. 69–77.
12. Сапожникова В.А., Груздев А.Н., Ageev B.G., Пономарев Ю.Н., Савчук Д.А. Связь вариаций содержания CO_2 и H_2O в годичных кольцах кедр сибирского с вариациями метеорологических параметров // *Докл. РАН.* 2013. Т. 450, № 5. С. 592–598. DOI: 10.7868/S0869565213170210.
13. Dewey E.R., Mandino O. Cycles: The Mysterious Forces that Trigger Events. New York: Hawthorn Books Inc. Publishers, 1971. 211 p.
14. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
15. Дмитриев А.А., Дубравин В.Ф., Белязо В.А. Атмосферные процессы Северного полушария (1891–2018 гг.), их классификация и использование. СПб.: Супер, 2018. 306 с.
16. URL: <https://argumenti.ru/society/nature/2023/12/873247>.

B.G. Ageev, V.A. Sapozhnikova, A.N. Gruzdev, D.A. Savchuk. Possible influence of the North Atlantic Oscillation on vital activity of trees (southeast of Western Siberia).

The relationships between variations in the residual gas content in discs of coniferous and deciduous trees growing in and around Tomsk (southeastern Western Siberia) and the North Atlantic Oscillation (NAO) were analyzed. The results of the work showed that (1) air temperature in Tomsk region significantly correlated with the NAO index; (2) the cross-spectral analysis of the chronologies of gas components of the deciduous tree discs with the air temperature during the growing season indicated the coherent fluctuations around a 4-year cycle; (3) the correlation coefficients of the NAO index with the chronologies of CO_2 ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), and the ring width of the six (of eight) tree discs were found. Based on the results, it is concluded that the North Atlantic Oscillation can affect the life activity of some Siberian tree species (on a 4-year time scale).