

УДК 551.583+630+561.24

## ДЛИТЕЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

© 2000 г. Академик Е. А. Ваганов, К. А. Бриффа, М. М. Наурзбаев,  
Ф. Г. Швейнгрубер, С. Г. Шиятов, В. В. Шишов

Поступило 10.05.2000 г.

В последние годы внимание исследователей ряда стран обращено на глобальные климатические изменения. Примером может служить публикация в "Science" в 1997 г., которая содержала интегральную оценку климатических изменений (температуры) в арктических областях северного полушария, основываясь на информации, зафиксированной в годичных кольцах, озерных отложениях, изотопах в слоях ледников и океанических осадках [1]. Наиболее полно в статье был использован материал из субарктических областей Северной Америки. Азиатскую часть Евразии представляли только три точки и соответственно три временные серии палеоклиматических индикаторов (рис. 1а). Авторы отмечали необходимость в будущем увеличения объема данных, особенно в Евразии. К моменту публикации статьи необходимые для обобщения материалы для азиатской части субарктической области были уже получены, но из-за публикации книги на русском языке они оказались неиспользованными [4]. Данная работа восполняет этот пробел, привлекая массовый материал для сравнительного анализа длительных изменений температуры в арктической области северного полушария по временным сериям палеоклиматических данных как из Северной Америки, так и Азиатской субарктики. На рис. 1б отмечены места сбора дендрохронологических данных в Азии, которые использованы как основные источники информации и построения локальных древесно-кольцевых хронологий.

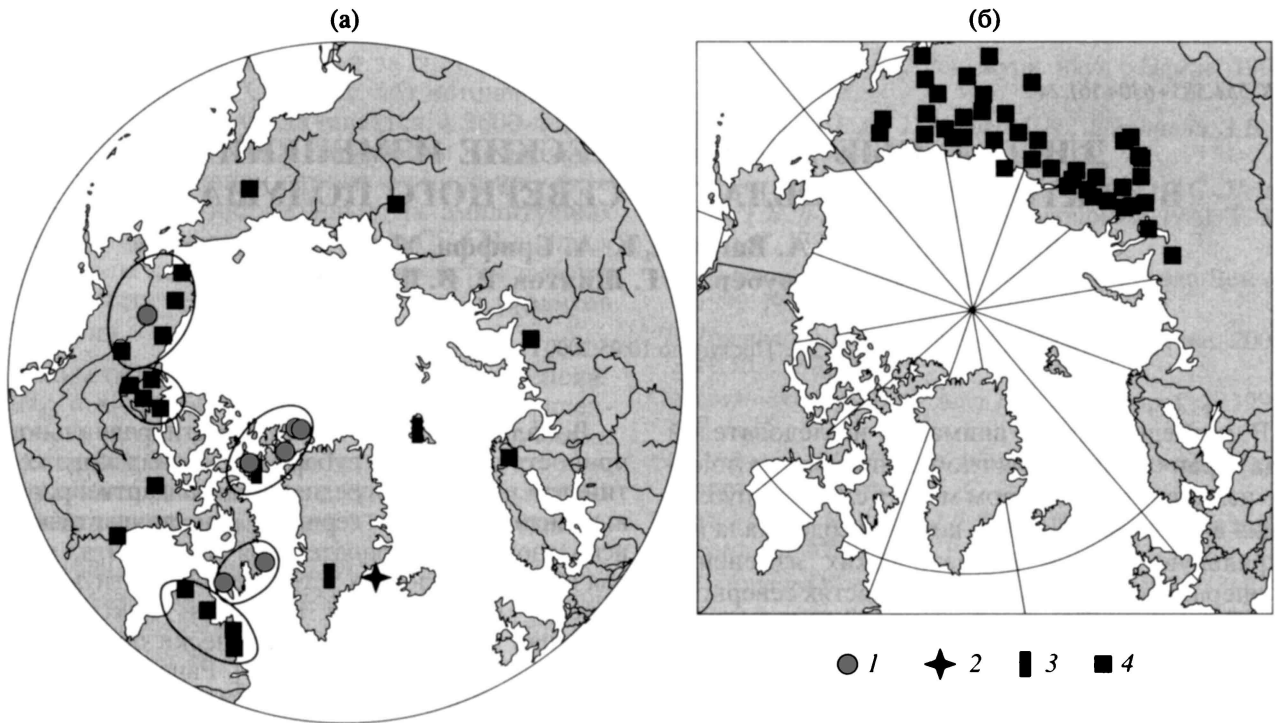
Локальные серии изменчивости радиального прироста деревьев в субарктике Азиатского континента получены усреднением стандартизованных индивидуальных серий [2]. Для стандартизации использовалась отрицательная экспонента, которая в данных условиях устраняет возрастную компоненту изменчивости прироста, максимально сохраняя длительные климатически обусловленные колебания прироста [2, 3]. Ранее в серии работ показано, что в субарктике Азиатского континента изменчивость радиального прироста на 60–70% объясняется вариацией летней температуры [4–6]. Высокая корреляция локальных хронологий с температурой ( $R = 0.69–0.84$ ) позволяет для реконструкции ее изменений по годичным кольцам использовать простые регрессионные уравнения [2]. На их основе локальные хронологии сами могут рассматриваться как серии стандартизованных изменений температуры, особенно если они нормированы на среднеквадратичное отклонение. Поэтому, чтобы исключить дополнительную процедуру статистического преобразования локальных хронологий годичных колец в нормированные значения изменений летней температуры, при получении обобщенной кривой по азиатской субарктике каждая из локальных хронологий нормировалась на среднеквадратическое отклонение, а затем преобразованные локальные серии усреднились по 5-летиям для всех исследованных точек. Итогом является обобщенная серия, в изменчивости которой преобладают длительные климатические изменения [6]. Полученная обобщенная кривая сопоставлена (рис. 2) с усредненными нормированными изменениями температуры в Арктической области [1].

Можно уверенно констатировать, что обе кривые сходны, т.е. изменения температуры за последние 400 лет в арктической области Азии соответствуют таковым, наблюдающимся главным образом в Северной Америке. До 1800 г. отмечается хорошая синхронность в наступлении коротких по времени потеплений и похолоданий при общем слабом положительном тренде температуры. Наиболее четко на обеих кривых выражено возрастание температуры с первых десятилетий

*Институт леса им. В.Н. Сукачева  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Красноярск*

*Университет Восточной Англии, Норвич  
Швейцарский государственный институт  
лесных, снежных и ландшафтных исследований,  
Бирменсдорф*

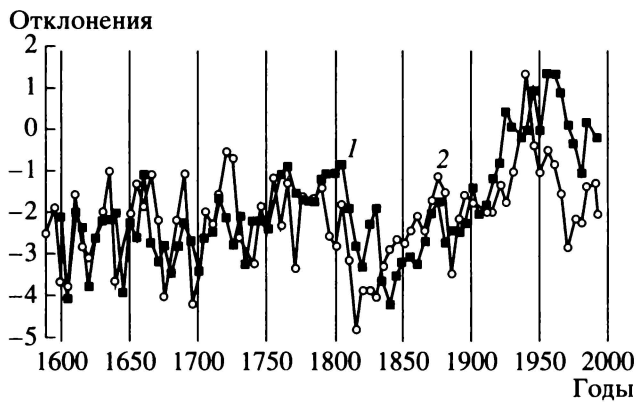
*Институт экологии растений и животных  
Уральского отделения Российской Академии наук,  
Екатеринбург*



**Рис. 1** Местоположение палеоклиматических источников, использованных в реконструкции длительных изменений температуры в [1] (а) и в субарктической области Азии (б). 1 – озерные отложения; 2 – океанические осадки; 3 – ледовые колонки; 4 – древесно-кольцевые хронологии.

тий XIX до середины XX столетия. Наибольший температурный минимум в арктической области Азии приходится на второе десятилетие XIX столетия, в то время как ранее опубликованный ряд показывает наибольшее понижение температуры за последние 400 лет в 1840-х годах. Интересные результаты показывает корреляция между сравниваемыми кривыми за отдельные интервалы времени и за весь период. Так, за периоды с 1600 по 1750 г. и с 1750 по 1900 г. корреляция значима при  $p < 0.05$ , но невелика ( $R = 0.38$ ). За индустриальный период (с 1800 по 1990 г.) корреляция заметно возрастает ( $R = 0.65$ ,  $p < 0.001$ ) вследствие четко выраженного возрастания температуры, которое уверенно проявляется на обеих кривых. Интересно отметить, что за период с 1900 по 1990 г. корреляция между двумя интегрированными кривыми снижается ( $R = 0.43$ ). За весь исследуемый период (с 1600 по 1990 г.) корреляция между двумя кривыми изменения температуры в арктической области северного полушария составила 0.54 при  $p < 0.001$ .

В упомянутой ранее работе рассматривались такие возможные источники длительных изменений температуры, как повышение углекислоты, метана, сульфатов (как индикатора вулканической активности) в атмосфере, а также поступление солнечной радиации, длительные ряды регистрации которых опубликованы [1, 7–9]. Было отмечено, что потепление после 1920 г. вероятнее всего обусловлено увеличением тепличных газов в атмосфере. Этот вывод следует из хорошего совпадения повышения температуры в арктических областях северного полушария с ростом содержания углекислоты в атмосфере, но поскольку потепление началось с середины XIX столетия, важную роль играли также повышение солнечной радиации, уменьшение вулканической активности и обратные связи в самой климатической системе [1].



**Рис. 2.** Сопоставление длительных изменений температуры по данным [1] (1) и сети древесно-кольцевых хронологий субарктики Азии (2).

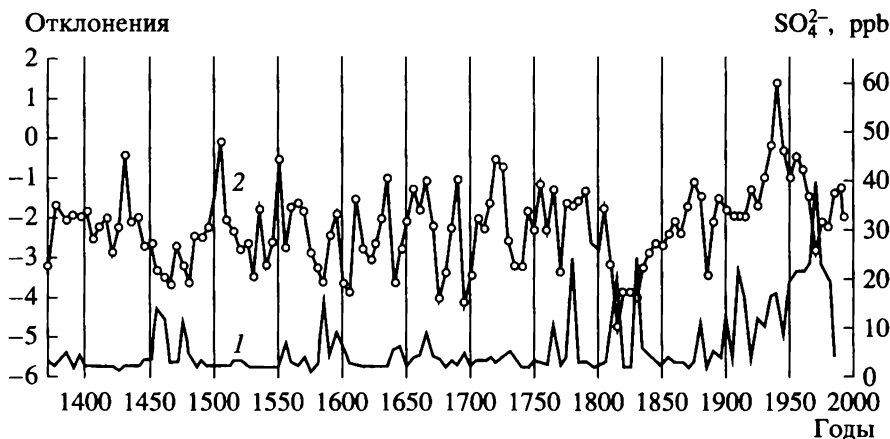


Рис. 3. Длительные изменения вулканической активности по данным [7] (1) и радиального прироста деревьев в субарктике Азии (2).

Расчеты корреляции между перечисленными характеристиками и усредненной кривой изменения температуры показали, что за весь анализируемый период значимая связь отмечается только между изменением температуры и приходящей солнечной радиацией ( $R = 0.59$ ). Эта связь возрастает для периода с 1900 по 1990 г. ( $R = 0.65$ ). Кривая, построенная по длительным древесно-кольцевым хронологиям для субарктической Азии, показывает значимую корреляцию с солнечной радиацией (для всего периода  $R = 0.32$ , для индустриального периода с 1800 по 1990 г.  $R = 0.68$ ) и с характеристикой вулканической активности (для всего периода  $R = -0.41$ , для индустриального периода  $R = -0.59$ ).

Особенно наглядно отрицательное влияние повышения вулканической активности на изменения летней температуры в арктической области показывает сопоставление усредненной древесно-кольцевой кривой и содержания сульфатов за последние 600 лет (рис. 3). Важно отметить, что локальные минимумы падения температуры на кривой, полученной для субарктики Азии, соответствуют локальным всплескам вулканической активности (например, 1450–1470, 1550-е, 1580-е, 1600–1610, 1640-е, 1690–1700, 1810–1820, 1880–1890, 1970-е годы). Кривая температуры с преобладанием данных по Северной Америке такой четкой обратной синхронности не обнаруживает, что подтверждается также незначимой корреляцией между этими характеристиками ( $R = -0.01$ ). Последнее может быть обусловлено как реальной ситуацией, так и разным качеством палеоклиматических источников, использованных для реконструкции температуры. Динамика изменения температуры в субарктике Азиатского континента показывает лучшее соответствие с уменьшением приходящей солнечной радиации и повышением вулканической активности в период с начала 1800-х

до 1840-х годов, чем это можно наблюдать на интегральной кривой изменения температуры, полученной в основном по арктической области Северной Америки. Совпадение холодных лет с крупнейшими вулканическими извержениями отмечено ранее при использовании древесно-кольцевых хронологий Евразии с высоким (годовым) разрешением [10, 11].

При анализе длительных изменений температуры в субарктической области Сибири отмечено, что, во-первых, амплитуда текущего потепления пока не выходит за пределы реконструированных естественных колебаний температуры в субарктической области в период голоцена, и, во-вторых, современное потепление характерно увеличением частоты лет с аномально теплым летом на всей субарктической территории Сибири (широтном трансекте длиной около 5000 км) [2, 12]. Т.е. современное потепление чаще “синхронизирует” увеличение температуры в разных секторах субарктики северного полушария. Поэтому эффект потепления, даже в прогнозируемых пределах, может иметь глобальные последствия, особенно для изменения продуктивности растительности субарктических областей и ее статуса как аккумулятора углекислоты или выделения ее в атмосферу. Нет сомнения, что представленные интегрированные данные составят хорошую основу для калибровки и верификации глобальных климатических моделей. Использование в моделях сети древесно-кольцевых хронологий субарктической области Сибири кажется предпочтительным по сравнению с другими косвенными источниками вследствие ряда их очевидных достоинств: высокого временного разрешения, значимой корреляции с ведущими механизмами глобальных изменений климата, длительностью и хорошей пространственной сетью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 99-05-64182) и INTAS (грант 97-1418).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Overpeck J., Hughen K., Hardy D. et al. // Science.* 1997. V. 278. № 14. P. 1251–1256.
2. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.
3. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences / E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. Eds. Norwell, Mass.: Kluwer Acad., 1990. 394 p.*
4. *Schweingruber F.H. Tree Rings and Environment. Dendroecology. Bern: Paul Haupt. Publ., 1996. 609 p.*
5. *Briffa K.R., Schweingruber F.H., Jones P.D. et al. // Nature.* 1998. V. 391. P. 678–682.
6. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Хантемиров П.М., Нурзбаев М.М. // ДАН. 1998. Т. 358. № 5. С. 681–684.
7. *Lean J., Beer J., Bradley R. // Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 3195–3298.
8. *Stuiver M., Braziunas T.F., Grootes P.M., Zielinski G.A. // Quaternary Res.* 1997. V. 48. P. 259–266.
9. *Zielinski G.A., Mayewski P.A., Meeker L.D. et al. // Science.* 1994. V. 264. P. 948–952.
10. *Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., Osborn T.J. // Nature.* 1998. V. 393. P. 450–455.
11. *Hughes M.K., Vaganov E.A., Shiyatov S.G. et al. // Holocene.* 1999. V. 9. № 5. P. 603–608.
12. *Naurzbaev M.M., Vaganov E.A. // J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № 6. P. 7317–7327.