

А.С. БАЛЫБИНА, О.В. ВАСИЛЕНКО

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, balybina@irigs.irk.ru, oksa\_na85@mail.ru

## ДЕНДРОИНДИКАЦИЯ ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ОЗЕРНЫХ КОТЛОВИНАХ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

Представлены результаты применения дендрохронологического метода индикации гелиофизического и гидроклиматического сигнала на малых временных масштабах (от десятилетий до столетий) в озерных котловинах Байкальской рифтовой зоны. Рассматривались три позиции: дендроиндикация климатических параметров в Прибайкалье; дендроиндикация динамики уровня оз. Байкал; оценка гидроклиматического сигнала в Прихубсугуле. Установлено, что значения ширины годичных колец индицируют минимумы и максимумы в величинах температуры воздуха и почвы, но при этом реконструированный ряд имеет слаженные значения. Последний цикл повышения температуры почвы может свидетельствовать об экстремальном проявлении потепления климата, в том числе и почвы. В реконструированном ряде значений уровня оз. Байкал методом спектрального Фурье-анализа обнаружены различные циклы: от 53 до 11 лет. Следовательно, периоды с низким уровнем озера наблюдались и ранее, однако после происходит восстановление до нормальных, и даже высоких значений. В Прихубсугуле наблюдается высокий отклик в приросте лиственницы на летние температуры воздуха (июнь–август). Сопоставление индексов ширины годичных колец с колебаниями солнечной активности позволяет говорить о наличии связи между этими характеристиками.

**Ключевые слова:** древесно-кольцевые серии, прирост годичных колец, функция отклика, Прибайкалье, Прихубсугулье, солнечная активность.

A.S. BALYBINA, O.V. VASILENKO

V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, balybina@irigs.irk.ru, oksa\_na85@mail.ru

## DENDROINDICATION OF THE HYDROCLIMATIC SIGNAL IN LAKE BASINS OF THE BAIKAL RIFT

The article presents the results of application of the dendrochronological method of indicating the heliophysical and hydroclimatic signal on small time scales (from decades to centuries) in the lake basins of the Baikal rift zone. Three items were considered: dendroindication of climatic parameters in Cisbaikalia; dendroindication of the dynamics of the Lake Baikal level; and assessment of the hydroclimatic signal in the Khubsugul region. It has been found that the values of the width of annual rings is indicative of minima and maxima in the values of air and soil temperature, but the reconstructed series gives the smoothed values. The last cycle of the soil temperature increase may be a manifestation of an extreme climate warming, including soil warming. In the reconstructed series of the Lake Baikal level values, various cycles from 53 to 11 years were detected using the spectral Fourier analysis. Consequently, formerly observed periods of a low lake level were followed by a recovery to normal and then even high values. A high response in the larch growth to summer air temperatures (June–August) is observed in the Khubsugul region. Comparison of the indices of the annual rings width with fluctuations in solar activity suggests a connection between these characteristics.

**Keywords:** tree-ring chronologies, annual rings growth, response function, Cisbaikalia, Khubsugul region, solar activity.

### ВВЕДЕНИЕ

Климатические изменения, происходящие на земном шаре в последние годы, приводят к необходимости поиска методов и подходов для прогноза состояния окружающей среды. В связи с этим успешно применяется дендрохронологический метод. Годичные кольца деревьев одновременно представляют собой комплексные характеристики климатических условий и выступают как интеграторы влияния внешних факторов. Внешние факторы, способные влиять на изменения климата Земли, могут носить как естественный характер, связанный, например, с влиянием Солнца, так и являться

результатом хозяйственной деятельности человека. Солнце — это основной источник энергии на планете, поэтому проблема влияния солнечных явлений на климатические и биологические процессы интересует исследователей уже более столетия. Детальное обсуждение влияния солнечной активности на различные явления метеорологического и биологического характера представлено еще в работах А.Л. Чижевского [1]. Поскольку прямое энергетическое воздействие коротковолновой и корпускулярной радиации Солнца на тропосферу и биосферу невозможно, идут поиски триггерных механизмов, при которых небольшие воздействия приводят к существенным изменениям природной системы [2–4]. В этом плане дендрохронологический метод представляет собой эффективный инструмент для индикации гелиофизического и гидроклиматического сигналов, особенно на малых временных масштабах — от десятилетий до столетий. Под гидроклиматическим сигналом мы понимаем регистрируемую в годичных кольцах информацию о лимитирующем влиянии климата (температуры воздуха, атмосферных осадков, влажности, солнечной радиации, уровня воды в озерах и т. д.).

Цель данной работы — рассмотрение трех аспектов: дендроиндикация климатических параметров в Прибайкалье; дендроиндикация динамики уровня оз. Байкал; оценка гидроклиматического и геофизического сигналов в Прихубсугулье.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дендрохронологический материал был отобран на территории побережий озер Байкал (в 2007–2009 гг.) и Хубсугул (в 2019 г.), относящихся к озерным котловинам Байкальской рифтовой зоны. Сбор дендрологических образцов проводился на разных участках — как находящихся непосредственно у уреза воды (до 10 м), так и существенно удаленных от него (100 м). Отбор образцов древесины производился в виде кернов посредством возрастного бурава на высоте 1,3 м по одному радиусу. В лабораторных условиях была произведена подготовка образцов к измерениям по общепринятой методике [5], измерена ширина годичных колец (ШГК) с точностью 0,01 мм при помощи измерительной установки LINTAB 6 и специального программного пакета TSAP [6].

Дендрохронологические данные представлены древесно-кольцевыми сериями (ДКС) сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*). Ряд наблюдений по всем древесно-кольцевым сериям превышает 100 лет. Средний возраст деревьев составил на побережье оз. Байкал 161 год, в Прихубсугулье 148 лет.

Для дендроиндикации климатических параметров в Прибайкалье древесные керны были отобраны на территории Прибайкальского (Приольхонье) и Забайкальского (побережье п-ова Святой нос и Чивыркуйского залива) природных национальных парков. Определение связей прироста деревьев выполнено с привлечением данных близлежащих к месту отбора образцов метеостанций (МСТ): Узур, о. Большой Ушканий, Нижнеангарск [7]. Дополнительно включены данные по температуре почвы МСТ Баргузин, расположенной в южном замыкании Баргузинской котловины, где прослеживается достаточно ощутимое термическое влияние на климат водной массы Байкала.

Анализ и оценка отклика гидроклиматического сигнала побережья оз. Хубсугул были выполнены на основе древесно-кольцевых серий (ДКС) и данных о температуре воздуха и суммах атмосферных осадков двух ближайших МСТ, расположенных примерно на равном расстоянии от места отбора кернов (удаление около 50 км): Монды (Россия) и Хатгал (Монголия). Использованный ряд наблюдений на МСТ Монды составляет 74 года (1949–2023 гг.), на МСТ Хатгал 60 лет (1963–2023 гг.). Кроме этого, для оценки глобального геофизического сигнала в ДКС рассчитывались функции отклика на числа Вольфа, показывающие солнечную активность.

Статистический анализ связей индексов прироста деревьев с климатическими параметрами проведен по известной методике оценки и интерпретации функций отклика, которые рассчитываются путем определения частных коэффициентов корреляции [8].

Для анализа динамики уровня оз. Байкал в XV–XX вв. с помощью метода дендроиндикации материал был отобран на территории Забайкальского национального парка на побережье оз. Байкал в местах впадения рек Большая Черемшанка и Кедровая. Кроме полученных хронологий, для удлинения временного ряда использованы древесно-кольцевые хронологии, полученные Г.И. Галазием и сотрудниками лаборатории ботаники и дендрохронологии Лимнологического института СО АН СССР в 1950-х гг. и опубликованные в сборнике «Дендроклиматологические шкалы Советского Союза» [9]. Значения уровней оз. Байкал взяты из Государственного доклада о состоянии озера Байкал в 2003 г. [10]. Фактические уровни воды оз. Байкал в естественных условиях (до 1956 гг.) варьировали от

454,93 м ТО (зафиксированный исторический минимум в 1904 г.) до 457,10 м ТО (зафиксированный максимум в 1869 г.) [11]. С применением методики [12] значения были пересчитаны и приведены к однородному ряду.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Дендроиндикация климатических параметров в Прибайкалье.** Анализ связей индексов прироста деревьев в Прибайкалье с температурой почвы на глубине 0,8 м позволил установить, что наибольший отклик прироста на температуру почвы наблюдается в марте (коэффициенты корреляции 0,30–0,60) и июле–августе (0,30–0,70), наименьший — в декабре (0,05–0,10) и мае (0,15–0,20). Максимальный отклик в июле–августе сопряжен с оптимальным сочетанием тепла и влаги, которые накопились в почве в летний период.

Особо следует отметить, что коэффициент корреляции прироста годичных колец лиственницы и температуры почвы на МСТ Узур (о. Ольхон) низкий в течение всего года (значимый только в марте — 0,40). Причина в том, что для Приольхонья, в том числе и о. Ольхон, летом характерны теплые, но засушливые климатические условия, зима холодная (умеренно холодная) и малоснежная. Вся почвенная толща зимой интенсивно охлаждается, глубина сезонного промерзания — 2,5 м. Летом происходит ее интенсивное прогревание. Температура почвы 10 °C достигает 1,5 м, температура 5 °C характерна для глубины ниже 3,2 м.

Ранее отмечалось, что и температура воздуха не относится к лимитирующему фактору для прироста ширины годичных колец лиственницы и сосны. Более значима связь индекса прироста с атмосферными осадками сентября прошедшего и июля текущего года [13, 14]. Можно предположить, что лимитирующее влияние осадков на прирост годичных колец хвойных деревьев проявляется через увлажнение почвы. Следует отметить, что влага в почве здесь в большом дефиците.

Летом климат на п-ове Святой Нос засушливый и умеренно холодный. Зима умеренно холодная и умеренно снежная. Почвенная толща на о. Большой Ушканий, который расположен вблизи о. Святой Нос, зимой интенсивно охлаждается, сезонное промерзание продолжительное и глубокое. Летом она прогревается умеренно интенсивно. Температура 10 °C не наблюдается глубже 0,7 м.

Исходя из наибольшего коэффициента корреляции в годовом цикле в июле (0,7) между температурой почвы на МСТ Большой Ушканий остров и индексом прироста лиственницы, произрастающей на юго-западном побережье п-ова Святой Нос, проведена ее реконструкция. Установлено, что значения индицируют минимумы и максимумы в величинах температуры, но при этом сглаживают их. За период с 1967 по 2000 г. по фактическому ряду температуры почвы линейный тренд равен 0,297 °C/10 лет, а по реконструированному — 0,158 °C/10 лет. Причем и в том, и в другом случае величину тренда определяет наиболее интенсивное повышение температуры почвы в последнем десятилетии XX в. [15]. Величина тренда в реконструированном ряду температуры почвы с 1885 по 2006 г. составляет всего лишь 0,006 °C/10 лет, а коэффициент корреляции между совпадающими участками рядов равен 0,6. Важно отметить, что в реконструированном ряду циклы повышений и понижений температуры почвы находятся в фиксированных пределах. Исключением является последний цикл повышения температуры, который в пределах всего реконструированного ряда несколько выше. Отмеченная ситуация может свидетельствовать об экстремальном проявлении потепления климата и почвы в этот период. Также были рассчитаны коэффициенты корреляции между суммами атмосферных осадков на МСТ Большой Ушканий остров и ШКГ лиственницы. Наибольшие положительные коэффициенты корреляции наблюдаются у модельного образца, отобранного в районе р. Большой Черемшанки на расстоянии 30 м от уреза воды, с февральскими и октябрьскими суммами атмосферных осадков, а также у образца, взятого на расстоянии 30 м от уреза воды р. Кедровой с суммой осадков за ноябрь и за холодный период (ноябрь–март). Обратная связь наблюдается у модельных образцов, отобранных в районе р. Кедровой в 50 м от уреза воды, с осадками за октябрь, а также у образца, взятого на берегу р. Большой Черемшанки в 5 м от уреза воды, с осадками за декабрь. Положительная связь с февральскими суммами атмосферных осадков, возможно, объясняется эффектом сохранения тепла в прикорневой системе, так как снежный покров способствует этому, а также повышает количество влаги в почве в предвегетационный период.

**Дендроиндикация динамики уровня оз. Байкал.** Анализ отклика значений уровня оз. Байкал в приросте годичных колец современных ДКС и ДКС, полученных Г.И. Галазием [9], показывает, что отклик на уровень озера в приросте годичных колец наблюдается как положительный, так и отрица-

тельный, причем значения корреляции по модулю выше, чем между температурой воздуха, атмосферными осадками и приростом годичных колец. Положительный отклик наблюдается при росте дерева на значительном расстоянии от береговой линии, в то время как древесно-кольцевые серии деревьев, растущих в непосредственной близости от уреза воды, показывают негативное влияние повышения уровня озера (подмытие берега, корневой системы, повышенная влажность). Более тесная связь прироста годичных колец и уровня озера наблюдалась в период до строительства Иркутской ГЭС, однако и после него отклик в приросте на изменения уровня достаточно высок.

Значимые связи между изменчивостью прироста и уровнем оз. Байкал позволили получить количественную модель реконструкции уровня по дендрохронологическим данным. На рис. 1 представлены фактические и реконструированные значения уровней оз. Байкал.

Модель реконструкции описывает до 60 % изменчивости уровня озера. Реконструкция индицирует периоды высоких уровней (1471–1477, 1511–1523, 1537–1542, 1678–1682, 1693–1697, 1792–1794 гг.), а также довольно длительные периоды низких уровней (1418–1465, 1490–1508, 1553–1561, 1613–1617, 1641–1652, 1685–1689, 1739–1742, 1810–1814, 1860–1865, 188–1894, 1919–1928 гг.).

В реконструированном ряде значений уровня оз. Байкал методом спектрального Фурье-анализа обнаружены следующие циклы: 53, 33, 23, 17 и 11 лет. Они совпадают с циклом увлажнения Брикнера (около 35 лет) и с цикличностью солнечной активности (22 и 11 лет), что говорит о взаимосвязи глобальных и региональных климатических колебаний.

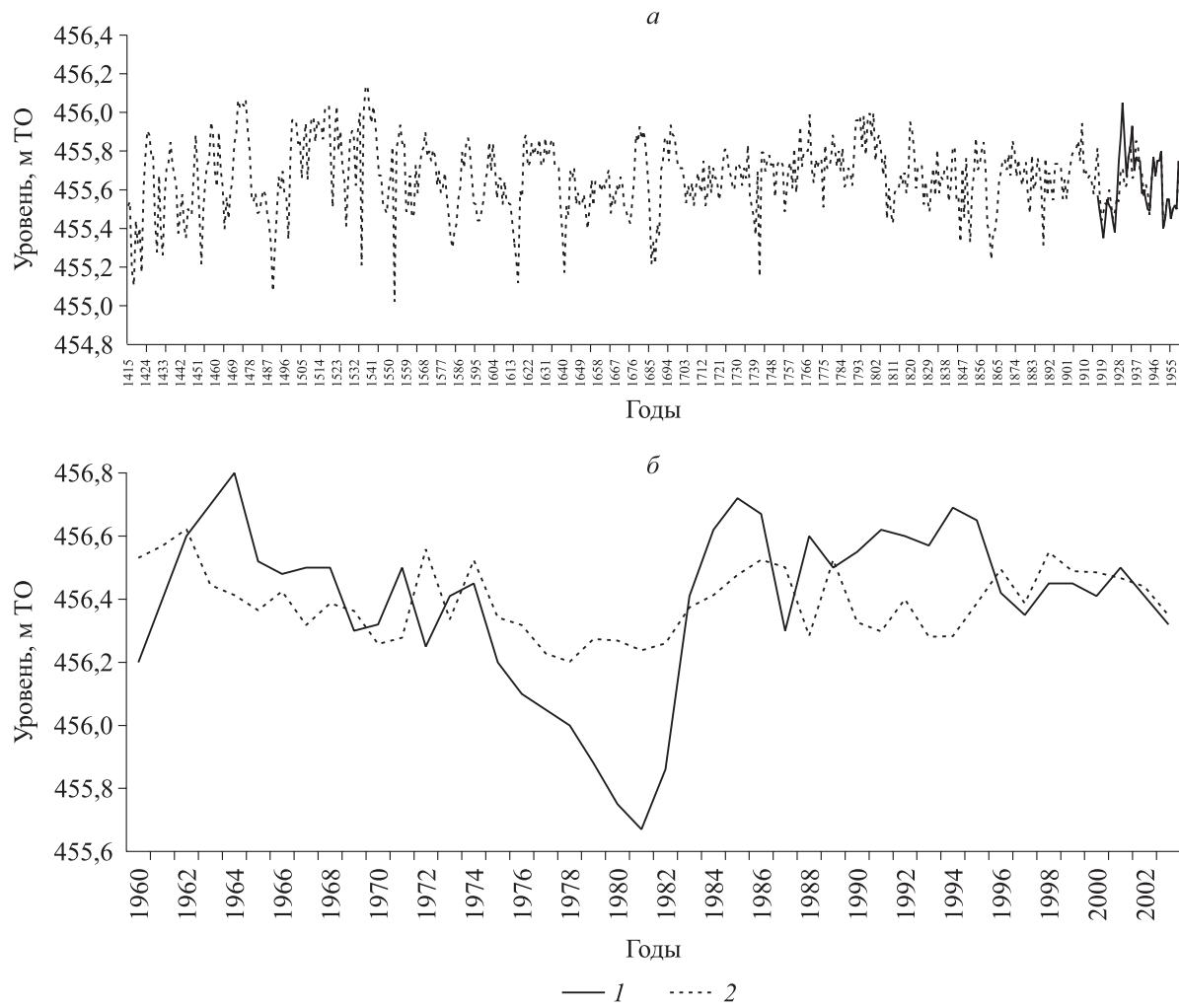


Рис. 1. Фактические и реконструированные значения уровня озера Байкал за период до строительства Иркутской ГЭС (а) и после строительства Иркутской ГЭС (б).

1 — фактические значения; 2 — реконструированные значения.

**Оценка гидроклиматического сигнала в Прихубсугулье.** При оценке отклика гидроклиматического сигнала на территории Прихубсугулья проведен анализ коэффициентов корреляции между ДКС каждого образца на трех модельных участках на побережье оз. Хубсугул. Коэффициенты корреляции составляют 0,7–0,8, что говорит о хорошей сходимости серий древесных колец и о подверженности роста отдельных деревьев одинаковым условиям на определенном участке произрастания. При пере-

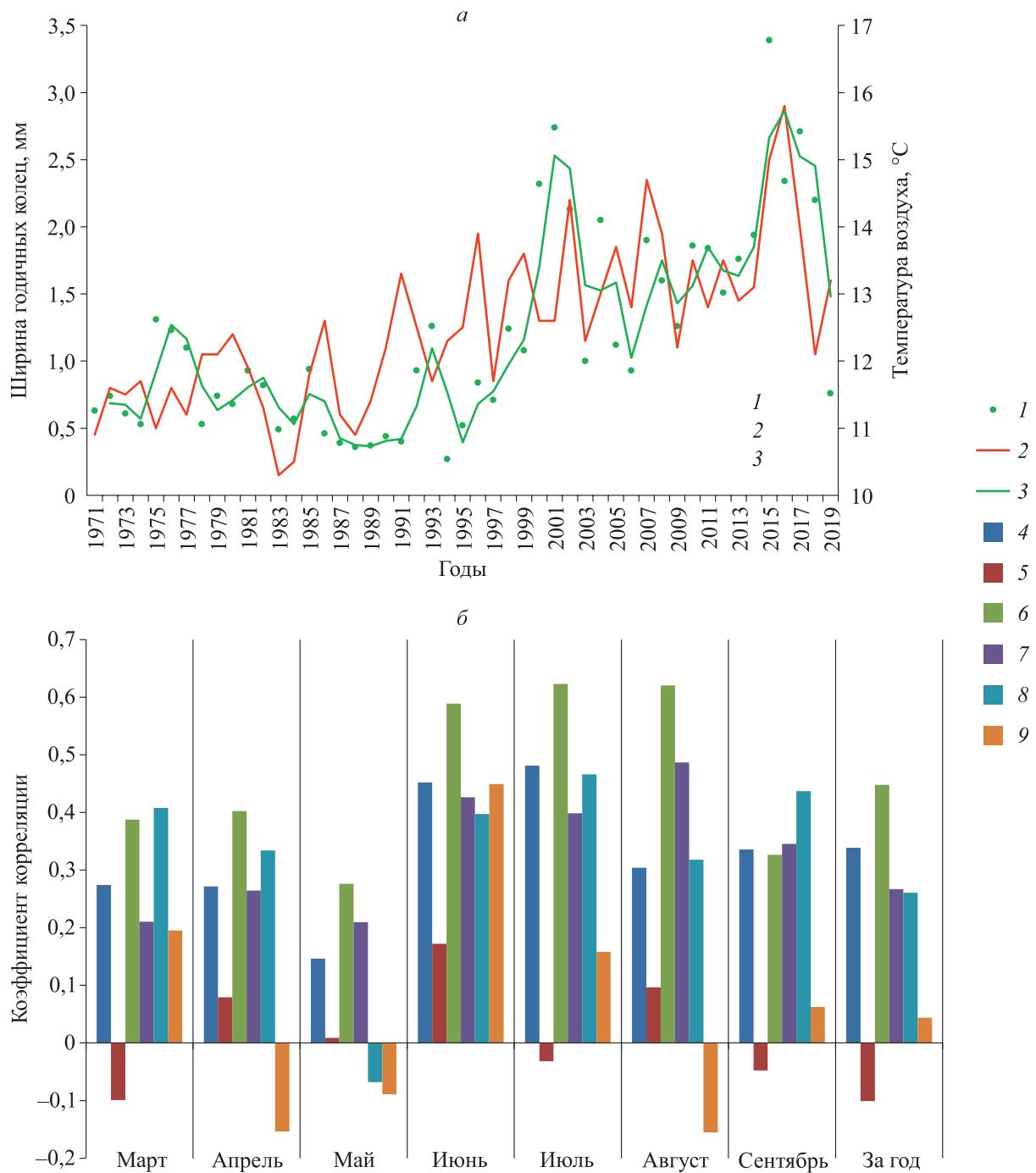


Рис. 2. Динамика ширины годичных колец (а) и ее связь со средними месячными температурами воздуха (б) на МСТ Хатгал.

1 — динамика ШГК; 2 — средняя месячная температура воздуха в июле на метеостанции Хатгал; 3 — двухлинейный фильтр (динамика ШГК); 4–9 — модельные образцы (ДКС).

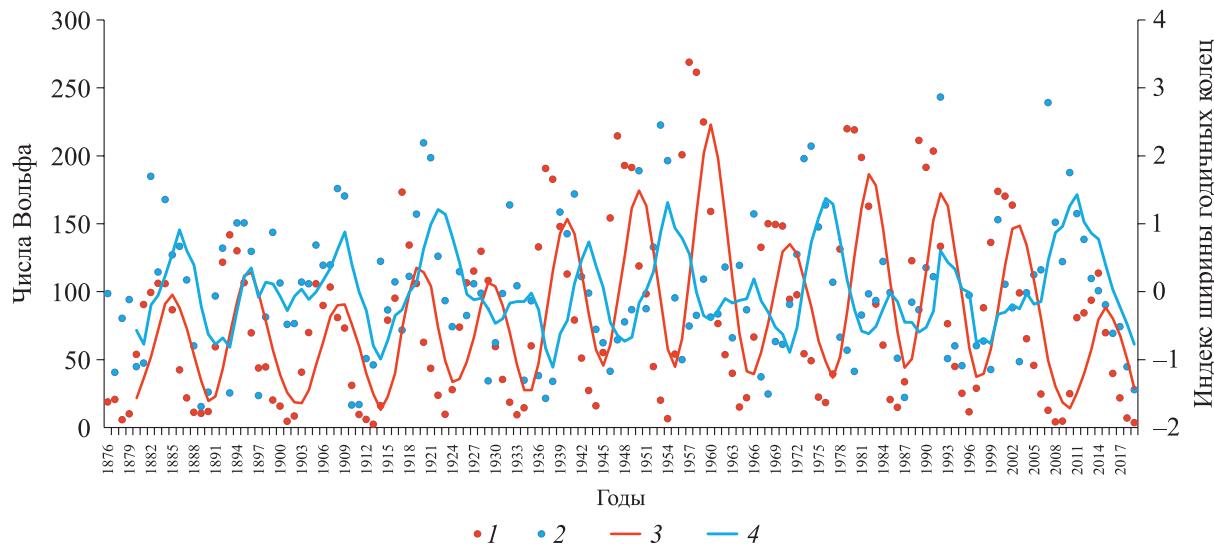


Рис. 3. Сопоставленная динамика ширины годичных колец и ряда чисел Вольфа.

1 — годовые числа Вольфа; 2 — индекс ШГК; 3 — линейные фильтры: 3 — годовые числа Вольфа; 4 — индекс ШГК.

воде абсолютных величин прироста древесины в относительные — индексы — происходит исключение наиболее крупных (возрастных) колебаний.

Проведенный корреляционный анализ ДКС со средними температурами воздуха за каждый месяц, а также со средней годовой температурой выявил климатический сигнал в серии годичных приростов древесины: статистически значимые коэффициенты корреляции колеблются в пределах от 0,32 до 0,62. Нами представлена динамика ширины годичных колец (ШГК) модельного образца, отобранного на восточном берегу оз. Хубсугул, и многолетнего хода средней месячной температуры июля на МСТ Хатгал (рис. 2, а). Как можно видеть, при двухлетнем слаживании визуально наблюдается хорошее сходство. Возможно, это говорит о том, что эффект влияния проявляется в ширине годичного кольца лишь на следующий год. Кроме этого, показаны коэффициенты корреляции некоторых ДКС со средними месячными температурами марта–сентября, а также со средней годовой температурой воздуха на МСТ Хатгал (см. рис. 2, б). При этом видно, что отклик на летние температуры воздуха (июнь–август) довольно высок — от 0,48 до 0,62.

Коэффициенты корреляции прироста ШГК с суммами атмосферных осадков на МСТ Хатгал оказались статистически незначимы, в то время как динамика атмосферных осадков на МСТ Монды нашла отклик в динамике ДКС. Коэффициенты корреляции колеблются в пределах от 0,30 до 0,47 в июне.

Также, кроме оценки влияния на прирост локальных климатических условий, была сделана попытка оценить глобальный геофизический сигнал в ДКС. Для этого были взяты числа Вольфа, показывающие солнечную активность, которую многие исследователи считают одним из главных климатообразующих факторов. При визуальном сопоставлении индексов ШГК с колебаниями солнечной активности можно отметить наличие связи между этими значениями (рис. 3). Особенно хорошо это заметно в начале и в конце роста дерева (первые три и последние три цикла солнечной активности).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сказать о перспективности направлении дендроиндикации гидроклиматического сигнала в озерных котловинах Байкальского рифта, особенно в Прихубсугулье, так как в суровых климатических условиях отклик проявляется наиболее ярко. Дендроиндикация гидроклиматического сигнала дает возможность достоверных климатических реконструкций. Опыт зарубежных коллег [16] показывает, что реконструкция климатических параметров с использованием годичных колец деревьев может быть относительно стабильной в течение некоторых сезонов (например, май–июль). Данные по годичным кольцам деревьев могут обеспечить непрерывный учет палеоклиматических

данных по регионам или периодам времени без инструментальных климатических данных. Однако разные виды древесных растений реагируют на разные климатические параметры, например, некоторые из них чувствительны к влажности, а другие — к температуре.

Периоды с довольно низким уровнем оз. Байкал наблюдались и ранее, однако после происходило восстановление до нормальных и даже высоких значений. Реконструированные значения температуры почвы в последние десятилетия свидетельствуют о проявлении потепления климата и почвы в этот период.

В то же время, несмотря на довольно неплохую сходимость реконструированных и фактических значений гидроклиматических параметров, в дальнейшем планируется проводить подобные исследования с применением современных математических методов, например, так называемых нейронных сетей. Их использование различными российскими и зарубежными исследователями [17, 18] показало лучшую оправдываемость таких дендроклиматических реконструкций по сравнению с традиционными методами (в том числе математической регрессии).

*Работа выполнена в рамках темы НИР (AAAA-A21-121012190059-5).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. — М.: Мысль, 1973. — 349 с.
2. Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов / Под ред. А. Бруцека, Ш. Дюрана. — М.: Мир, 1980. — 256 с.
3. Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И. Солнце и атмосфера Земли. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 322 с.
4. Вительс Л.А. Синоптическая метеорология и гелиогеофизика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 254 с.
5. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. — М.: Наука, 1986. — 136 с.
6. Rinn F. TSAP. Version 3.0. Reference manual. Computer program for time series analysis and presentation. — Heidelberg: Frank Rinn Distribution, 2008. — 9 р.
7. Российский гидрометеорологический портал. Каталог данных Единого государственного фонда данных о состоянии окружающей природной среды [Электронный ресурс]. — <http://meteo.ru/climate> (дата обращения 10.09.2024)
8. Fritts H.C. Tree-ring and climate. — London; New-York; San Francisco: Acad. Press, 1976. — 567 р.
9. Галазий Г.И. Дендрошкилы Прибайкалья и плато Путорана // Дендроклиматологические шкалы Советского Союза. — Каунас: Институт ботаники АН Лит. СССР, 1981. — С. 31–38.
10. ФГБУ «Росгеолфонд». Сибирское отделение [Электронный ресурс]. — [www.geol.irk.ru/baikal](http://www.geol.irk.ru/baikal) (дата обращения 05.09.2024).
11. Гармаев Е.Ж., Цыдыпов Б.З., Дабаева Д.Б., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Куликов А.И. Уровенный режим озера Байкал: ретроспектива и современное состояние // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2017. — № 2. — С. 4–18.
12. Андреев С.Г., Ваганов Е.А., Наурзбаев М.М., Тулохонов А.К. Регистрация годичными кольцами сосны многолетних колебаний атмосферных осадков, стока реки Селенги и уровня озера Байкал // Докл. Академии Наук. — 1999. — Т. 368, № 3. — С. 400–403.
13. Балыбина А.С. Реконструкция колебаний климата в Предбайкалье дендрохронологическим методом // География и природ. ресурсы. — 2006. — № 4. — С. 126–129.
14. Осколков В.А., Воронин В.И. Экологические факторы, определяющие прирост сосны и лиственницы в Приольхонье // Сибирский экологический журнал. — 2005. — № 4. — С. 717–730.
15. Балыбина А.С., Трофимова И.Е. Дендроиндикация температуры почвы в котловинах Байкальского типа // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 2. — С. 58–65.
16. García-Suárez A.M., Butler C.J., Baillie M.G.L. Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate: A multi-species approach // Dendrochronologia. — 2009. — Т. 27, № 3. — Р. 183–198.
17. Gu H., Wang J., Ma L., Shang Z., Zhang Q. Insights into the BRT (Boosted Regression Trees) method in the study of the climate-growth relationship of Masson pine in Subtropical China // Forests. — 2019. — Т. 10, № 3. — Р. 228.
18. Jevsenak J., Levanic T., Dzeroski S. Predicting the Vessel Lumen area tree-ring parameter of *quercus robur* with linear and nonlinear machine learning algorithms // Geochronometria. — 2018. — Т. 45, № 1. — Р. 211–222.

*Поступила в редакцию 04.10.2024*

*После доработки 07.10.2024*

*Принята к публикации 31.10.2024*