

А.М. Догановский, Н.В. Федосеева, М.Н. Лукина

ПРОТИВОФАЗНОСТЬ КОЛЕБАНИЙ УВЛАЖНЕННОСТИ КРУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЛЕСНОЙ ЗОНЫ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ И ВОСТОКЕ ЕВРАЗИИ

A.M. Doganovsky, N.V. Fedoseeva, M.N. Lukina

ANTIPHASE OSCILLATIONS MOISTURE OF LARGE FOREST AREA IN THE NORTH-WEST AND EAST OF EURASIA

Рассматриваются особенности распределения серий лет повышенного и пониженного увлажнения во времени и в пространстве на территории лесной зоны Евразии. В качестве индикатора режима увлажнения выбраны многолетние ряды уровней слабопроточных озер, установлены наиболее значимые 30-летние флуктуации. В качестве вынуждающих факторов исследованы центры действия атмосферы (ЦДА) и разработаны количественные меры их оценки (индексы САК и СТК).

Ключевые слова: увлажнение, озеро, уровень, режим, фазы водности, тренды, спектральная плотность, сплайн, индексы увлажнения, циркуляция атмосферы.

Spatio-temporal features of distribution of low and high humidity year series within the forest zone of Eurasia are considered. As an indicator of the humidity regime, multi-year series of oblong lakes' levels are chosen. Nearly 30-year fluctuations are estimated to be the most sufficient. As forcing factors, atmospheric centers of action (ACA) were studied; the quantifying measures of their estimation were defined (NAO and PDO).

Key words: humidity, lake, level, regime, waters phases, trends, spectral density, spline, humidity indices, atmospheric circulation.

Введение

Неравномерное распределение водности крупных территорий имеет большое значение при планировании хозяйственного использования водных ресурсов. Эффективность использования этих ресурсов повышается при условии учета закономерностей их изменчивости (колебаний) во времени и в пространстве. При этом колебания могут быть синхронными, синфазными или, наоборот, асинхронными, асинфазными. Если в одном районе наблюдается повышенная водность (например, выше среднего), в другом пониженная (ниже среднего), то в промежутке между ними наблюдается сдвиг фаз. Отсюда возможны и промежуточные решения, такие как учет временных и пространственных сдвигов фаз водности. Установление таких

закономерностей имеет помимо научного интереса и большое практическое значение при решении многих гидрологических, водохозяйственных, водноэнергетических задач. Например, необходимо учитывать асинхронность колебаний водности при проектировании и строительстве мощных каскадов гидроэлектростанций и объединение уже существующих в единую государственную систему [16]. Эту закономерность также следует учитывать при развитии ирригации и планировании сельскохозяйственного производства. При этом возникает возможность взаимной компенсации мощностей энергетических или ирригационных систем при наличии длительных маловодий или многоводий в разных частях рассматриваемых территорий. Отметим, что синхронность или асинхронность колебаний увлажненности территорий может иметь место как на очень больших пространствах, например, в масштабе материков, так и на региональном уровне. Причиной этого в первую очередь являются периодические перестройки атмосферной циркуляции и связанные с ними региональные климатические особенности.

Вопросу колебаний водности на больших территориях в нашей стране посвящено большое количество работ, которые относятся, как правило, к 50–80-м гг. прошлого столетия [2, 5, 6, 9, 10, 12]. В настоящее же время такие исследования практически свернуты и закономерности колебаний водности в период современного потепления климата анализируются недостаточно. Можно лишь говорить об отдельных исследованиях, например [4, 15]. В то же время очевидно, что установление пространственно-временных закономерностей распределения водности на территории лесной зоны Евразии не потеряло своей актуальности.

Материалы, методы, результаты

Для установления закономерностей колебаний водности выполнено большое количество исследований. Прежде всего, вопрос стоял о наличии циклических колебаний водности или периодов высокого и низкого стояния, например, уровней или расходов воды в реках — объектах, имеющих продолжительные периоды наблюдений за этими компонентами. Согласно ранее выполненным исследованиям на крупных реках, на которых в рядах стока высока доля случайных составляющих, обнаружены нечетко выраженные циклы и чаще всего это относительно высокочастотные составляющие [2, 6, 9, 10].

В качестве объектов, на которых можно выделить квазипериодические разночастотные колебания, приняты озера, которые рассматриваются как индикаторы увлажнения. Поскольку озера — водоёмы с замедленным водообменом, то на них четче должны проявляться низкочастотные колебания уровней воды и тренды. Такой результат определяется особыми условиями формирования заметных серий высокого и низкого стояния уровней (или циклов).

Интенсивность водообмена, определяемая коэффициентом водообмена (K_b), связана со значениями корреляционных радиусов или первых коэффициентов автокорреляции $r(1)$ рядов уровней воды и строением озерных систем:

$$r(1) = 1 - (K_b / \varphi), \quad (1)$$

где Φ — показатель особенностей строения озерной котловины; K_v определяется как отношение годового притока воды в озеро к его объему и показывает интенсивность смены воды в озере.

Высокие коэффициенты автокорреляции характерны для бессточных озер. Для сточных озер они, как правило, относительно высоки лишь для крупных объектов. Такие водные объекты и выбраны для решения поставленной задачи, при этом рассмотрены временные и пространственные изменения уровня. Для расчетов взяты крупные озера лесной зоны с замедленным водообменом, имеющие длинные ряды наблюдений и расположенные на большом расстоянии друг от друга практически в одном широтном поясе на территории Евразии: Ладожское, Байкал и Ханка. Ладога находится в Карелии и Ленинградской области и является крупнейшим пресноводным озером в Европе. Байкал расположен на границе Иркутской области и Республики Бурятия и является самым глубоким озером на планете, крупнейшим природным резервуаром пресной воды. Озеро Ханка расположено на границе Приморского края России и провинции Хэйлунцзян Китая и является самым крупным пресноводным водоемом на Дальнем Востоке. Одновременно рассмотрены и другие озера в этой же зоне, но имеющие меньшие размеры, более короткие ряды наблюдений и более интенсивный водообмен. Характеристики рассматриваемых объектов приведены в таблице. Для определения закономерностей колебаний уровней имеющиеся ряды наблюдений удлинены с помощью аналогов. Удачным аналогом для Ладожского озера является озеро Сайма, уровни озера Байкал восстановлены Афанасьевым [3]. К сожалению, не удалось подобрать аналог для озера Ханка. Однако в работе [7] доказываются наличие в XIX в. в ряду уровней этого объекта четко выраженных 30-летних флуктуаций. После проверки рядов на однородность были разработаны и введены поправки для исключения влияния Иркутской ГЭС на режим уровней оз. Байкал. Сведения о продолжительности исследуемых рядов приведены также в таблице, а графики колебаний уровней основных водоемов представлены на рис. 1.

Сведения об исследуемых озерах

Озеро	Местоположение озёр/ длина ряда	Площадь озера A_o , км ²	Объем воды в озере V_o , км ³	Площадь водосбора $A_{вб}$, км ²	Удельный водосбор K	Коэффици- ент внешнего водообмена K_v
Ладожское	(60°50'03" с.ш. 31°33'10" в.д.)/157	17872	837	276000	15,4	0,080
Байкал	(53°13' с.ш. 107°45' в.д.)/159	31722	23615	570000	17,9	0,0026
Ханка	(45°01' с.ш. 132°25' в.д.)/93	4070	18,3	16980	4,17	0,120
Сайма	Финляндия (61°15'54" с.ш. 28°19'32" в.д.)/135	4380	36,0	61054	13,9	0,60
Воже	Вологодская область (60°35'22" с.ш. 39°05'33" в.д.)/69	422	1,08	6260	14,8	1,58
Лача	Архангельская область (61°20'00" с.ш. 38°48'00" в.д.)/69	356	0,60	12600	35,4	3,65
Дрвенцкое	Польша (53°42'57" с.ш. 19°55'11" в.д.)/70	8,80	-	-	-	-

Озеро	Местоположение озёр/ длина ряда	Площадь озера A_o , км ²	Объем воды в озере V_o , км ³	Площадь водосбора $A_{об}$, км ²	Удельный водосбор K	Коэффици- ент внешнего водообмена K_n
Чудско- Псковское	Эстония, Россия (58°40'36" с.ш. 27°29'30" в.д.)/89	3555	25,0	47800	13,4	0,50
Телецкое	Алтай (51°31'45" с.ш. 87°42'53" в.д.)/83	223	40,0	20400	91,5	0,067

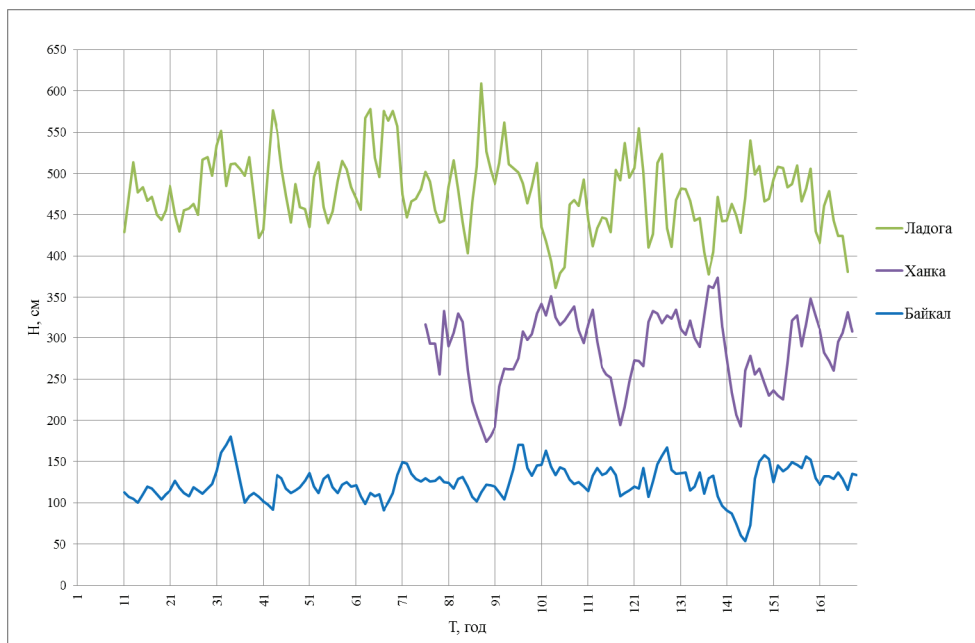


Рис. 1. Графики колебаний уровней основных исследуемых озер

Из рисунка следует, что ряды уровней озер представляют собой сложный полициклический процесс, состоящий из разночастотных гармоник и «шума». При этом даже визуально можно видеть хорошо выраженные 30-летние флуктуации и менее значимые 11-летние. Наличие такой цикличности подтверждено при анализе спектрограмм рассматриваемых озер (рис. 2).

Оценка значимости выявленных циклов в ряду выполнена с помощью одного из наиболее часто применяемых критериев согласия χ^2 Пирсона для уровней значимости 5 %, 10 % и 90 %. При этом подтвержден приоритет 30-летних флуктуаций на фоне менее значимых около 11-летних. Для установления дат наступления фаз водности выполнен гармонический анализ рядов уровней всех исследуемых озер. В качестве математического аппарата принят сглаживающий фильтр кубический сплайн [8], а в качестве контрольного быстрое преобразование Фурье. Для решения нашей задачи эти фильтры, по-видимому, наиболее подходят, так как не приводят к сдвигу частотных составляющих

по фазе. Сплайн-функция дает возможность объективно выявить разночастотные колебания, задаваясь различными степенями сглаживания (от тренда до интерполяции). В нашем случае преобразование Фурье также позволяет выделить гармоники. При этом каждому выявленному периоду соответствует определенный номер гармоники. Так для аппроксимации 30-летних колебаний использованы первые шесть гармоник. Результаты аппроксимации рядов уровней рассматриваемых озер приведены на рис. 3.

Взаимный анализ сглаженных двумя способами рядов уровней озер показывает хорошую согласованность их изменений (коэффициент корреляции близкий к 1), что подтверждает наличие практически гармонических 30-летних колебаний, появляющихся на большой территории. Подобные результаты получены и при анализе рядов вспомогательных объектов. Однако при анализе пространственного распределения сглаженных рядов было обнаружено несовпадение фаз водности вплоть до их противофазности. Так, максимумы выявленных 30-летних циклов на Ладожском озере соответствуют минимумам на озере Ханка, соответственно многоводная фаза на Ладоге соответствует маловодной на Ханке. В то же время на близко расположенных озерах, например, Ладожском и Чудско-Псковском эти сроки практически совпадают. На озерах, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, наблюдается сдвиг фаз по времени, который возрастает в зависимости от этого расстояния.

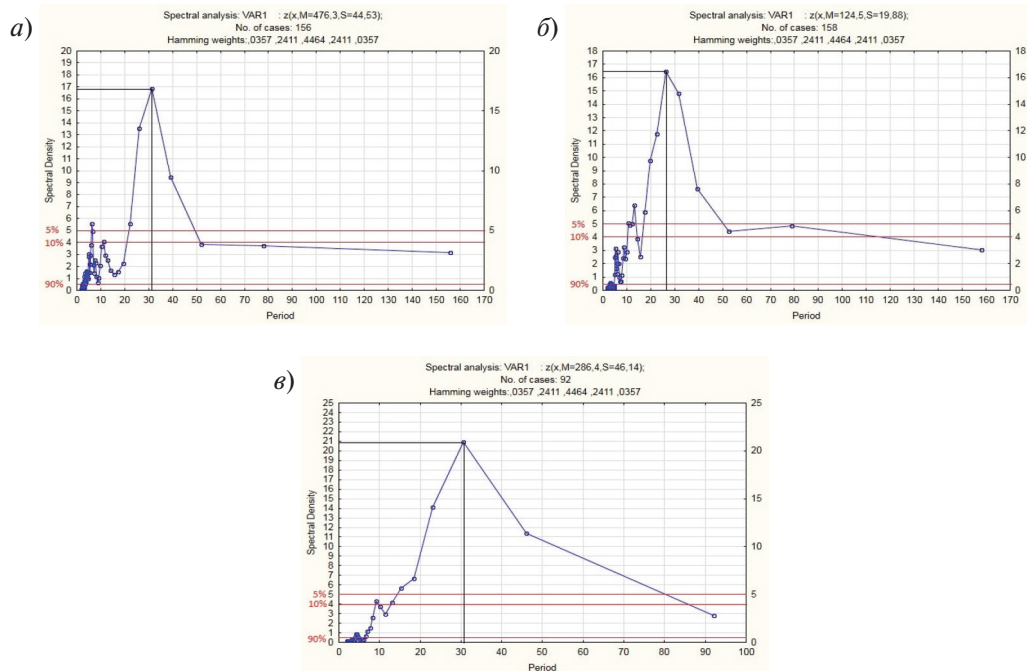


Рис. 2. Спектральные плотности уровней озер: а — Ладога; б — Байкал; в — Ханка

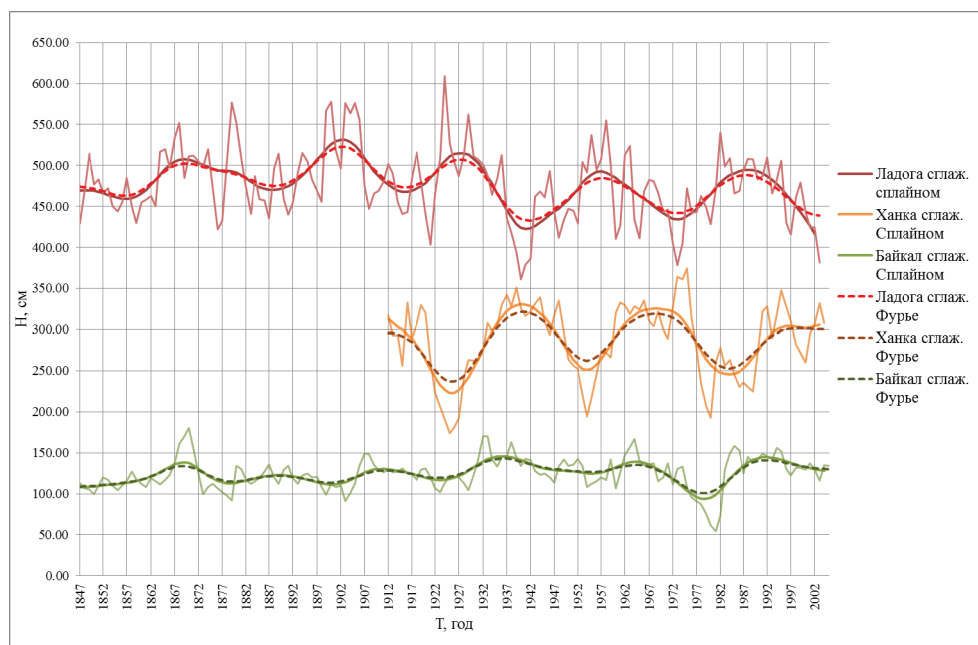


Рис. 3. Сглаживание рядов уровней основных исследуемых озер с помощью кубического сплайна и простого преобразования Фурье

Для оценки пространственного распределения колебаний уровней озер были построены и проанализированы взаимные корреляционные функции сглаженных рядов уровней для объектов, расположенных на разных расстояниях друг от друга. При этом корреляционные функции рассчитывались со сдвигом «вперед-назад» (рис. 4).

Анализ пространственного распределения колебаний позволил выявить противофазность уровней Ладоги (западная часть Евразии) и Ханки (восточная часть Евразии). Фазовый сдвиг равен 13 годам (что соответствует примерно $1/2$ периода), расстояние между объектами 6,5 тыс. км.

Колебания уровня Байкала «отстают» на $\sim 1/4$ (7 лет) периода по отношению к Ладоге и на $\sim 1/6$ (5 лет) периода «опережают» колебания уровня Ханки. Расстояния соответственно равны 4,5 тыс. км и 2,1 тыс. км. Подобные расчеты проведены и для всех других рассматриваемых водоемов, представленных в таблице. На рис. 5 в качестве примера приведены взаимные корреляционные функции рядов уровней озер, расположенных на различных расстояниях друг от друга: Ладога–Лача (350 км), Ладога–Телецкое (3,5 тыс. км).

Таким образом, уровневый режим слабопроточных озер отражает характер распределения увлажненности территорий во времени и в пространстве.

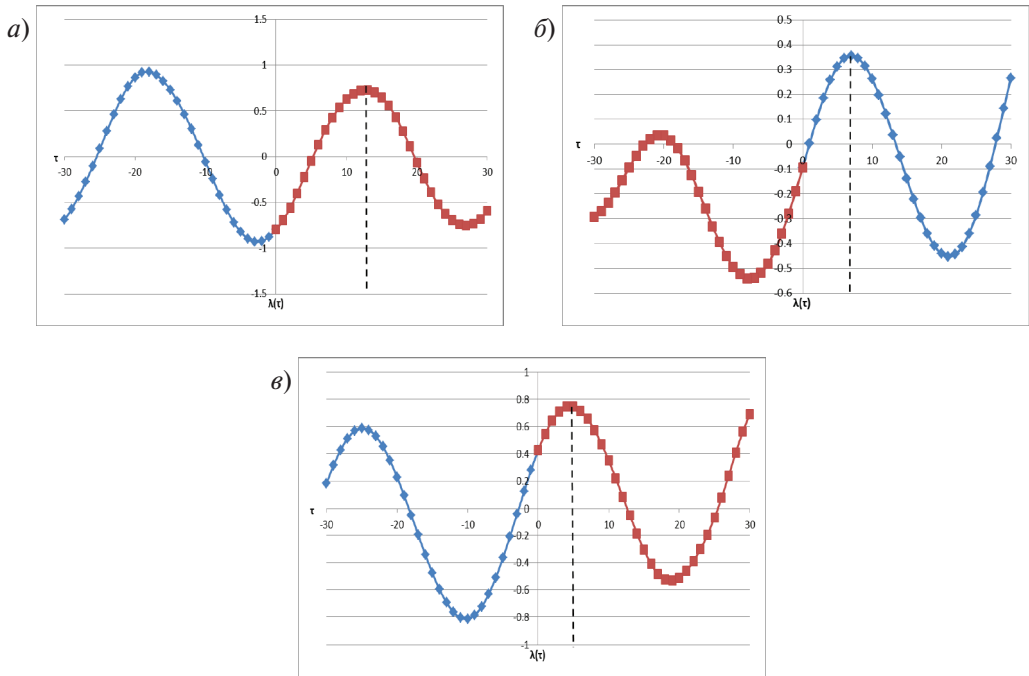


Рис. 4. Взаимные корреляционные функции: *a* — Ладога—Ханка; *б* — Ладога—Байкал; *в* — Байкал—Ханка

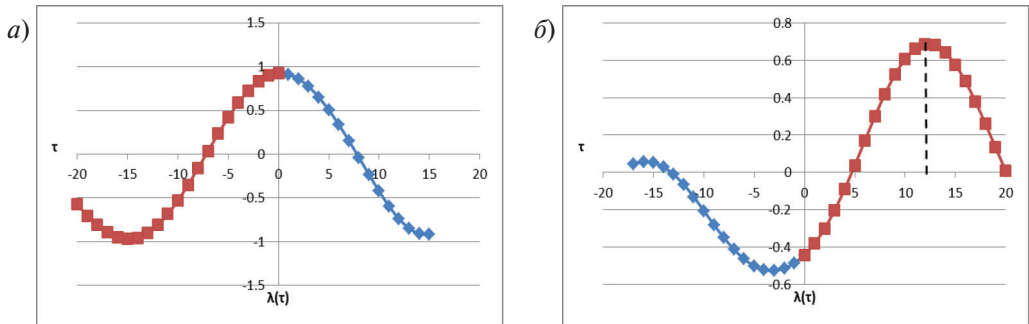


Рис. 5. Взаимные корреляционные функции: *a* — Ладога—Лача; *б* — Ладога—Телецкое

Основным источником увлажнения являются атмосферные осадки. Режим осадков и, опосредовано, уровень озер на Северо-Западе и Юго-Востоке Евразии, во многом, определяется местоположением и состоянием, так называемых, Центров Действия Атмосферы (ЦДА), локализованных над сопряженными акваториями Атлантического и Тихого океанов [1, 11, 17, 18]. Усиление или ослабление (синхронное или несинхронное) этих атмосферных вихрей, сопровождаемое их смещением к северо-востоку или юго-западу, соответственно, может обуславливать длительное преобладание

циклонического или антициклонического типа погоды на территории Европы, Восточной Сибири и Дальнего Востока. Так, например, при смещении этих квазистационарных вихрей в северо-восточном направлении в зимний период, на территории Северной Европы наблюдается увеличение количества осадков и уменьшение осадков в Южной и Центральной частях Европы и на Юго-Востоке Азии [13, 14].

В качестве количественной меры оценки локализации и состояния ЦДА предлагается использовать предложенные А.И. Угрюмовым и Н.В. Федосеевой индексы Северо-Атлантического и Северо-Тихоокеанского колебаний, которые вычисляются следующими формулами:

$$\begin{aligned} I_{\text{исл}} &= \frac{\Delta\varphi}{\sigma_{\varphi}} + \frac{\Delta\lambda}{\sigma_{\lambda}} - \frac{\Delta P}{\sigma_P}, & I_{\text{аз}} &= \frac{\Delta\varphi}{\sigma_{\varphi}} + \frac{\Delta\lambda}{\sigma_{\lambda}} - \frac{\Delta P}{\sigma_P}, & I_{\text{сак}} &= \frac{\Delta I_{\text{исл}}}{\sigma_{I_{\text{исл}}}} + \frac{\Delta I_{\text{аз}}}{\sigma_{I_{\text{аз}}}}, \\ I_{\text{ал}} &= \frac{\Delta\varphi}{\sigma_{\varphi}} + \frac{\Delta\lambda}{\sigma_{\lambda}} - \frac{\Delta P}{\sigma_P}, & I_{\text{гав}} &= \frac{\Delta\varphi}{\sigma_{\varphi}} + \frac{\Delta\lambda}{\sigma_{\lambda}} - \frac{\Delta P}{\sigma_P}, & I_{\text{стк}} &= \frac{\Delta I_{\text{ал}}}{\sigma_{I_{\text{ал}}}} + \frac{\Delta I_{\text{гав}}}{\sigma_{I_{\text{гав}}}}. \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ — аномалия значения широты местоположения ЦДА; $\Delta\lambda$ — аномалия значения долготы местоположения ЦДА; ΔP — аномалия значения давления в ЦДА; σ_{φ} , σ_{λ} , σ_P — среднеквадратические отклонения значений широты, долготы и давления ЦДА, рассчитанные по всему ряду инструментальных наблюдений.

Из формул следует, что индексы САК и СТК представляют собой алгебраические суммы нормированных аномалий значений широты, долготы и давления ЦДА и принимают максимальные значения при их углублении и смещении в северо-восточном направлении. Наоборот, минимальные значения индексов наблюдаются, когда ЦДА ослаблены и смещены к юго-востоку.

В спектрах колебаний значений этих индексов также были выделены 30-летние гармоника на основании спектрального анализа (рис. 6), выполненного после предварительной фильтрации рядов, которая позволила исключить наиболее высокочастотные колебания (1–3 года). Сравнение полученных спектральных характеристик обоих индексов позволило сделать предварительный вывод о большей информативности индекса САК в задачах анализа колебаний уровней озер.

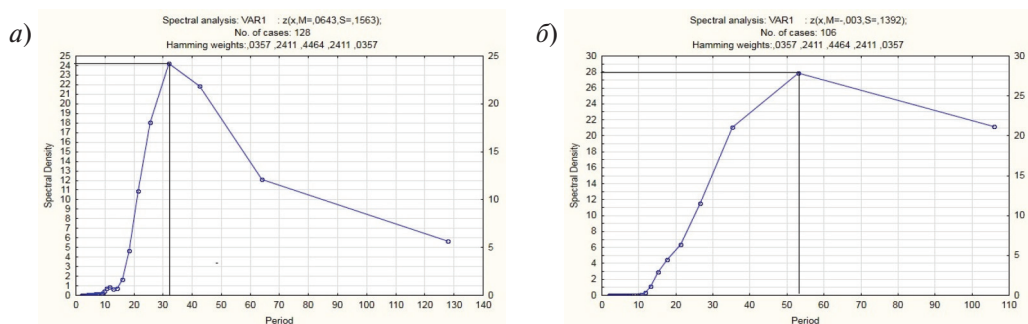


Рис. 6. Спектральная плотность индексов: а — САК; б — СТК

На рис. 7 представлены сглаженные с помощью кубического сплайна и простого преобразования Фурье ряды полученных значений индексов САК и СТК с исключенной в целях дальнейшего анализа трендовой составляющей.

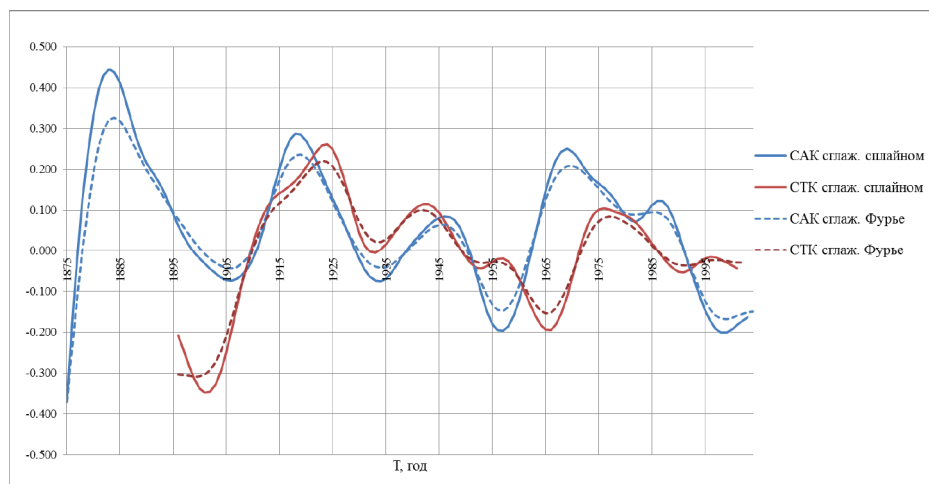


Рис. 7. Сглаживание значений индексов САК и СТК с помощью кубического сплайна и простого преобразования Фурье

Как следует из рис. 7, колебания индексов САК и СТК носят, в целом, согласованный во времени характер, что также подтверждается значениями корреляционной функции, рассчитанной между этими двумя показателями (рис. 8). При этом наиболее значимые коэффициенты корреляции наблюдаются при временном сдвиге рядов в 5–6 лет.

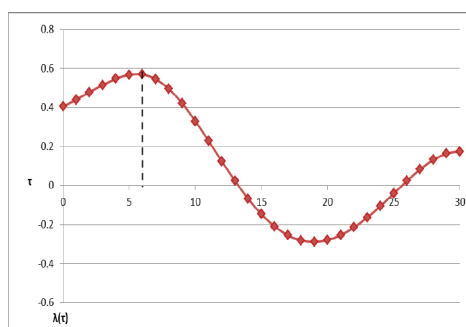


Рис. 8. Взаимная корреляционная функция индексов САК-СТК

В дальнейшем был проведен анализ взаимных корреляционных функций рядов значений индексов САК и СТК и уровней рассматриваемых озер (рис. 9), который

продемонстрировал, в целом, согласованный характер колебаний уровней озер Северо-Запада и противофазность колебаний уровенного режима озер на Юго-Востоке России с колебаниями индексов САК и СТК. Однако результаты, полученные при анализе согласованности изменений индекса Северо-Тихоокеанского колебания и уровней озер, подтвердили ранее сделанное предположение о меньшей информативности соответствующего индекса. Тем не менее, в дальнейшем, при подобном анализе, возможно объединение обоих индексов. При этом наличие фазового сдвига между колебаниями значений индекса САК и уровенным режимом озер представляет собой определенный прогностический интерес.

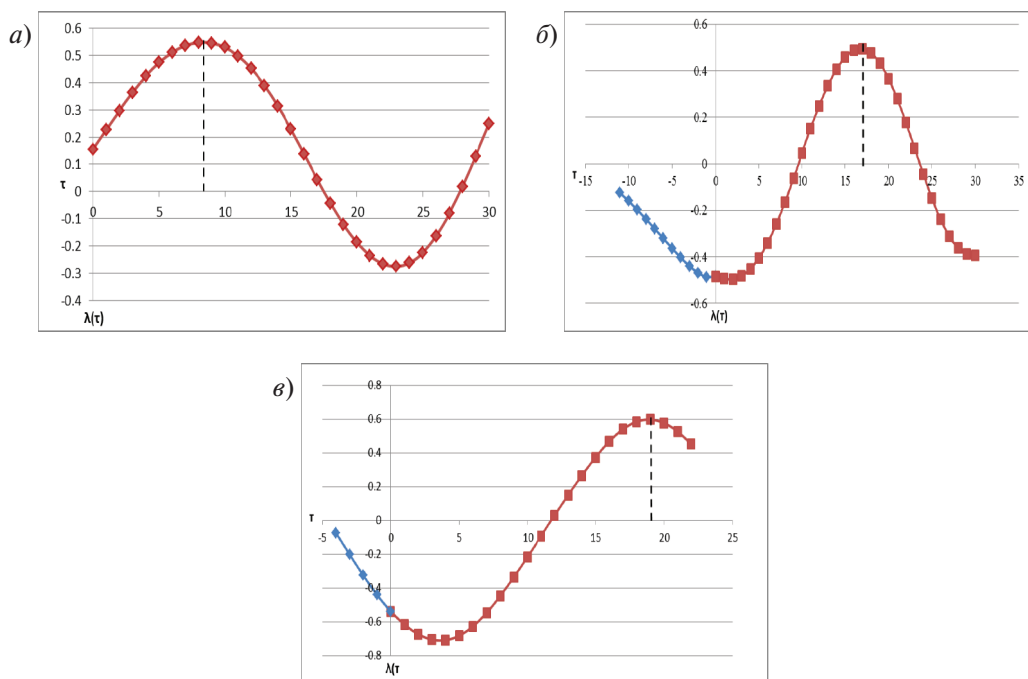


Рис. 9. Взаимные корреляционные функции: а — САК—Ладога; б — САК—Байкал; в — САК—Ханка

Выводы

В отличие от ранее выполненных исследований по определению режима увлажнения территории лесной зоны (колебания стока рек), в данной работе в качестве индикаторов увлажнения приняты слабопроточные озера, на которых формируются хорошо выраженные низкочастотные колебания уровней, то есть уменьшается вклад случайной компоненты. К таким колебаниям отнесены 30-летние флуктуации на фоне долговременных трендов. Для выделения этих гармоник привлечены методы спектрального анализа, сглаживающие функции кубический сплайн, преобразование Фурье. Расчеты выполнены для трех основных слабопроточных крупных озер Ладожского,

Байкала, Ханки, имеющих наиболее продолжительные ряды наблюдений. Такие же расчеты проведены и для 6 контрольных водоемов. Взаимный анализ рядов уровней показал наиболее тесную связь между 30-летними флуктуациями. При этом установлены противофазность колебаний Ладога–Ханка и наличие фазовых сдвигов Байкал–Ханка и Байкал–Ладога с разными значениями и знаками. Таким образом, режим высокой степени увлажнения на Западе предполагает низкое увлажнение на Востоке. Продолжительность этой фазы примерно 12–15 лет, после чего знаки меняются на обратные.

Выявленные тенденции в режиме наполнения озер оказалось возможным объяснить особенностями циркуляционных процессов в атмосфере. При этом в качестве вынуждающих факторов приняты усовершенствованные индексы Северо-Атлантического и Северо-Тихоокеанского колебаний. Ряду индекса САК и СТК также свойственны 30-летние колебания. Совместный анализ сглаженных рядов индексов и уровней озер показал их хорошую согласованность при фазовом сдвиге рядов примерно на половину периода или период солнечного цикла. Проведенный анализ результатов показал более высокую информативность индекса САК, демонстрирующего более устойчивую корреляционную связь с характером увлажнения лесной зоны России на всем ее протяжении с запада на восток. Помимо научного интереса к рассматриваемой проблеме, связанной с формированием особенностей характера увлажнения территории, полученные результаты имеют прогностическое значение.

Литература

1. *Абрамов Р.В.* Некоторые следствия географической детализации классической концепции центров действия атмосферы. // Труды ЛГМИ, 1969, т. 24, с. 22–30.
2. *Андреев В.Г.* Циклические колебания годового стока, их изменения по территории и учет при расчетах стока. // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. 2. — Л.: Гидрометеиздат, 1959, с. 326–335.
3. *Афанасьев А.Н.* Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР (В особенности в бассейне Байкала). — М.: изд-во «Наука», 1967. — 231 с.
4. *Болгов М.В., Коробкина Е.А.* Закономерности многолетних колебаний годового стока рек Сибири и Дальнего Востока. // География и природные ресурсы, 2011, № 2, с. 5–11.
5. *Воскресенский К.П.* Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 545 с.
6. *Давыдов Л.К., Калинин Г.П.* Пространственно-временной анализ цикличности стока рек. // Вестник МГУ, сер. геогр., 1967, № 4, с. 11–16.
7. *Джиавок Г.С.* Восстановление колебаний уровней оз. Ханка. // Материалы научной конференции по проблемам гидрологии рек зоны БАМ и Дальнего Востока, 1980, с. 178–184.
8. *Догановский А.М., Павлова Л.В.* Применение сплайн функций для анализа уровня режима озер. // Вопросы экологии и гидрологические расчеты, 1994, вып. 116, с. 111–114.
9. *Кочукова Т.И.* Колебания годового стока рек СССР. // Труды ГГИ, 1955, вып. 50, с. 56–116.
10. *Кузин П.С.* Циклические колебания стока рек Северного полушария. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 180 с.
11. *Мартынова Т.В.* О колебаниях положения и интенсивности центров действия атмосферы. // Метеорология и гидрология, 1990, № 4, с. 50–56.
12. *Сомов И.В.* Асинхронность колебаний стока крупных рек СССР. // Метеорология и гидрология, 1963, № 5, с. 14–21.
13. *Смирнов Н.П., Воробьев В.Н.* Северо-Тихоокеанское колебание и динамика климата в северной части Тихого океана. — СПб.: РГГМУ, 2002. — 122 с.
14. *Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Качанов С.Д.* Северо-Атлантическое колебание и климат. — СПб.: РГГМУ, 1998. — 122 с.

15. Христофоров А.В., Евстигнеев В.М. Пространственная изменчивость многолетних колебаний гидрологических характеристик. // Закономерности гидрологических процессов. — М.: ГЕОС, 2012, с. 306–314.
16. Шимельмиц И.Я., Баранов В.А., Резниковский А.Ш., Рубинштейн М.И. Об эффективности асинхронности и циклических колебаний речного стока для крупных энергетических объединений. // Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета. — М.: Изд. МГУ, 1967, с. 25–35.
17. Hurrell J.W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation. // Science, 1995, vol. 296, pp. 676–679.
18. Hurrell J.W. The North Atlantic Oscillation. // National Center for Atmospheric Research, National Academy of Sciences, 12th Annual Symposium «FRONTIERS OF SCIENCE», November 2–4, 2000.