

УДК 551.583

**АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ВОДЫ В СИСТЕМЕ
ВЕЛИКИХ СЕВЕРОАМЕРИКАНСКИХ ОЗЕР**¹Ослин С.Г., ^{1,2}Смагин А.И.¹Южно-Уральский институт биофизики, Озерск, e-mail: oslin@inbox.ru;²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, e-mail: Smagin54@mail.ru

Методом преобразования Фурье проведен анализ помесечных изменений уровней воды в Великих североамериканских озерах (Верхнее, Мичиган (Гурон), Сент-Клэр, Эри и Онтарио) за временной интервал наблюдений продолжительностью более ста лет. Анализ динамики изменения относительных объемов воды за месяц $\Delta V/V$ позволил выявить внутригодовые циклы с периодом 3, 4, 6 и 12 месяцев. Было установлено, что время наполнения для всех Великих озер приблизительно одинаково и составляет около 6 месяцев, а для водоемов с зарегулированным стоком параметр «продолжительность наполнения» в пределах годового интервала имеет большее значение. Амплитуды годовых гармоник уровней воды в Великих озерах тем больше, чем меньше объем воды или средняя глубина водоема.

Ключевые слова: Великие американские озёра, уровни вод, Фурье анализ, период и амплитуда гармонической составляющей

**ANALYSIS OF WATER LEVEL FLUCTUATIONS
IN THE GREAT NORTH AMERICAN LAKES**¹Oslin S.G., ^{1,2}Smagin A.I.¹Southern Ural Biophysics Institute, Ozersk, e-mail: oslin@inbox.ru;²Southern Urals State University (national research university), Chelyabinsk, e-mail: Smagin54@mail.ru

The analysis of long-term water level change data in the North American Great lakes (Upper, Michigan, Huron, St. Clair, Erie and Ontario) was performed by the Fourier transform method for the observation over hundred years time interval. It was found that there are intra-annual cycles with periods of 3, 4, 6 and 12 months in the dynamics of relative changes of the lake water volumes for the month $\Delta V/V$. The smaller water volume or average depth of the lakes are, the greater amplitude of the annual water levels harmonic of the Great lakes is.

Keywords: the Great North American lakes, water level, Fourier analysis, the amplitude and period of harmonic component

Изучение климата нашей планеты является одной из фундаментальных задач, поскольку влияет на самые разные аспекты жизни и деятельности человека [2]. Изменения климата могут служить причиной катастроф различного характера. Так, аномально высокие температуры засушливым летом и отсутствие осадков приводят – возникновению пожаров, а аномально высокое увлажнение – к переполнению водохранилищ, разрушению плотин, затоплению сельских территорий и зон промышленных предприятий. Динамика увлажнения территории определяет показатели стока, уровни воды в реках, водохранилищах и озерах. Так, изменение уровня воды в Теченском каскаде водоемов – хранилищ радиоактивных отходов (ТКВ) на Южном Урале может привести к экологической катастрофе. Стихийное превышение регламентного уровня водоемов ТКВ вызовет аварийный сброс загрязненных радионуклидами вод в открытую гидрографическую сеть, а пересыхание обнажение мелководий, высыханию высокоактивных илов и их ветровой разнос [4, 5, 6].

Впервые исследования по выявлению причин зависимости увлажнения территории от климатических изменений были начаты в конце 19 начале 20 в. А.И. Воейковым [1]. В наше время исследования механизмов увлажнения, формирующегося под действием различных климатических процессов, приобрели особую важность и актуальность не только с научной точки зрения, но и с практической, социальной и политической [2, 7]. В последние годы проводились многочисленные исследования, направленные на выявление закономерностей динамики атмосферных осадков и воздействия различных факторов на процессы увлажнения и обусловленную этими процессами динамику уровня воды водоемов [3].

Целью настоящего исследования является выявление особенностей в изменениях уровня воды водоемов методом преобразования Фурье с использованием рядов наблюдений уникальной длины.

Основная задача – анализ результатов штатных наблюдений, размещенных в открытом доступе в Интернете [11],

за изменениями уровней в системе Великих североамериканских озер Верхнее, Гурон, Мичиган, Эри и Онтарио, с использованием преобразования Фурье [10].

Материалы и методы исследования

Система Великих североамериканских озер расположена в восточной части североамериканского континента. Великие озера заполняют котловины, оставленные ледником, что обусловило морфометрические особенности этих водоемов. Северные берега озер большей частью скалистые, обрывистые, а южные – более низкие, глинистые и песчаные. Береговая линия местами изрезанная, на акватории водоемов много островов. Великие озера – самая крупная пресноводная система водоемов северного полушария, в которую входят оз. Верхнее, Гурон, Мичиган, Сент-Клэр, Эри и Онтарио [8] (рис. 1).

Вода из оз. Верхнее поступает по порожиистой реке Святого Мариса в оз. Гурон. Перепад высот между озерами составляет около 6 метров. Оз. Гурон связано с оз. Мичиган широкой протокой, и поэтому в дальнейшем оба озера мы будем анализировать как единую систему.

Вытекает из оз. Гурон река Сент-Клэр, впадающая в оз. Сент-Клэр – самое маленькое в системе Великих озер. Озеро Сент-Клэр имеет среднюю глубину 3,4 метра, а максимальную 8 метров, площадь зеркала составляет 1100 км². Из оз. Сент-

Клэр вытекает река Детройт, впадающая в оз. Эри. Перепад высот между оз. Гурон и оз. Эри составляет более 2,5 метров.

Река Ниагара соединяет оз. Эри и Онтарио. На реке расположен Ниагарский водопад, высота которого составляет 99 метров. Между озерами Эри и Онтарио проложен канал Велланд, обеспечивающий обход судов вокруг Ниагарского водопада. Из оз. Онтарио вода поступает в реку Сент Лоренс, которая впадает в р. Оттава, несущую воду в Атлантический океан. Основные гидрологические параметры озер приведены в табл. 1.

Для расчетов мы использовали данные о динамике гидрологических показателей Великих озер размещенные в открытом доступе на интернет сайте [11]. За гидрологическими параметрами проводились длительные систематические наблюдения продолжительностью более 100 лет, что позволяет выявить ряд скрытых закономерностей, которые невозможно определить, используя короткие ряды наблюдений. Периодическое изменение уровня воды в озерах, имеющее характер флуктуаций, можно представить рядом Фурье – суммой гармонических сигналов различной амплитуды и частоты (или периода). Частота или период этих сигналов использовалась нами для выявления закономерностей изменений уровня водоема или иных гидрологических параметров. Анализ данных проводили, используя алгоритм Фурье анализа, имеющийся в пакете «Анализ данных» приложения Excel набора MicrosoftOffice и реализующий быстрое преобразование Фурье [9].

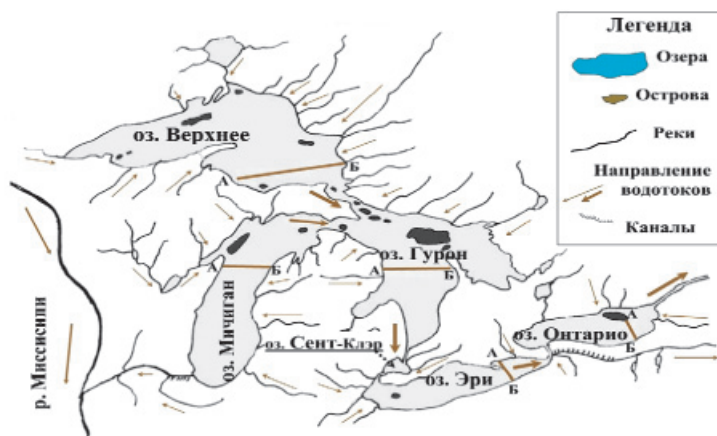


Рис. 1. Система Великих Североамериканских озер

Таблица 1

Основные гидрологические параметры Великих озер

Озеро	Площадь зеркала S , км ²	Высота над уровнем моря, м	Максимальная глубина H , м	Средняя глубина h , м	Направление стока	Объем V , км ³
Верхнее	82400	186	393	147	в оз. Мичиган и Гурон	12000
Гурон и Мичиган*	58000	176	Мичиган – 281 Гурон – 208	85	в оз. Сент-Клэр	4900
Онтарио	19500	75	236	86	р. Сент-Лоренс	1640
Эри	25700	174	64	10	в оз. Онтарио	480
Сент-Клэр	1114	175	8	3,4	в оз. Эри	3,4

Примечание. *Озера Гурон и Мичиган в дальнейшем анализируются как один водоем.

При анализе данных многолетних измерений уровней воды в озерах вычисляли параметр $\Delta V/V$ – отношение разности уровней последующего и предыдущего месяцев к отношению объема воды в озере к площади поверхности его зеркала по следующей формуле

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{h_n - h_{n-1}}{V/S},$$

где $\Delta V/V$ – анализируемый параметр; h_n – уровень воды в последующем месяце; h_{n-1} – уровень воды в предыдущем месяце; V – объём воды в озере; S – площадь зеркала воды озера.

Фактически параметр $\Delta V/V$ есть не что иное, как относительное изменение объема воды в озере за месяц.

Полученный сигнал $\Delta V/V$ исследовали с помощью преобразования Фурье [9]. В результате анализа для каждого из озер за время наблюдения строилась периодограмма, на которой по оси X откладывались периоды гармонических составляющих (гармоник), а по оси Y – их вещественные амплитуды. Особенностью алгоритма быстрого преобразования Фурье, применяемого в Excel, является то, что длина анализируемого набора данных должна быть кратна 2^n , то есть равняться, например, 512, 1024 или 2048.

Результаты исследования и их обсуждение

Для иллюстрации на рис. 2 приводятся периодограммы озер Верхнее и Мичиган (Гурон), полученные в результате преобразования Фурье. Аналогичные периодограммы были получены для всех Великих озер.

Из анализа рядов наблюдений следует, что за исследованный интервал во всех Великих озерах наблюдаются сезонные периоды 4, 6 и 12 месяцев. Наиболее интенсивная по амплитуде гармоническая составляющая имеет период около 12 месяцев. Озера Сент-Клэр, Эри и Онтарио кроме указанных периодов имеют дополнительные периоды приблизительно 3 и 8 месяцев.

Для исключения влияния погрешности, которая могла возникать при измерениях уровня воды на протяжении сотни лет на результаты анализа, проводилась проверка (рис. 3).

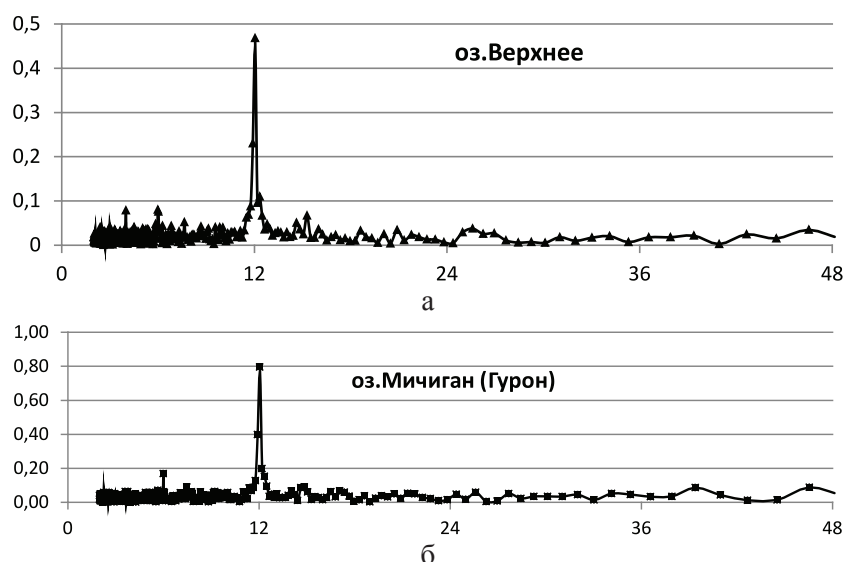


Рис. 2. Периодограммы ежемесячного относительного изменения объема воды $\Delta V/V$ в оз. Верхнее (а) и Мичиган и Гурон (б). По оси X – период гармоник в месяцах; по оси Y – амплитуда в относительных единицах

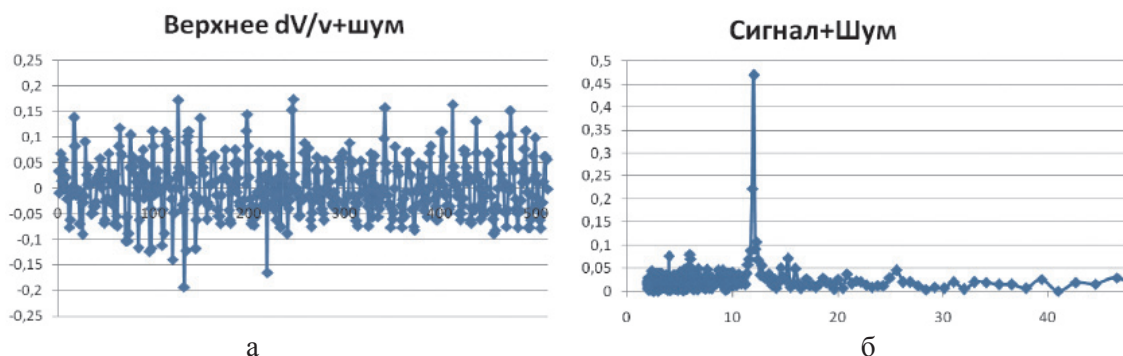


Рис. 3. Анализ рядов измерений уровня воды для оз. Верхнее

Значения $\Delta V/V$ суммировались с шумом, имеющим нормальное распределение и среднеквадратичное отклонение 0,001. Шум создавался с помощью генератора случайных чисел в Excel, и его амплитуда была сопоставима с амплитудой $\Delta V/V$. На рис. 3, а показан сигнал, представляющий сумму относительного изменения объема воды за месяц ($\Delta V/V$) для оз. Верхнее и случайного шума со среднеквадратичным отклонением $1 \cdot 10^{-3}$, и периодограмма, полученная с помощью анализа Фурье при обработке сигнала, представленного на рис. 3, б. В результате было установлено, что периоды гармоник не зависят от амплитуды шума в пределах, даже когда амплитуда шума сопоставима с амплитудой изменения $\Delta V/V$ для оз. Верхнее. Это свидетельствует о том, что на периоды гармоник не влияет погрешность измерения величины уровня воды, которая могла возникнуть в течение длительных наблюдений в результате смещения реперов.

Если периоды сезонных гармоник изменения уровня воды для всех Великих озер при анализе с начала наблюдения по настоящее время одинаковы, то соответствующие амплитуды оказываются различными (рис. 4).

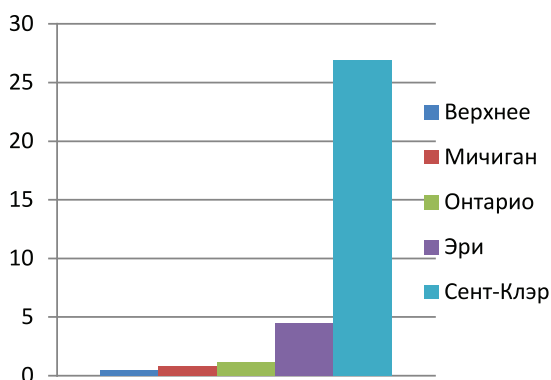


Рис. 4. Относительные амплитуды годовых гармоник $\Delta V/V$

Наименьшая величина амплитуды основной гармоники изменения уровня воды наблюдается у оз. Верхнее и оз. Мичиган, которые не имеют крупных притоков и являются наибольшими по объему воды, а наибольшая величина амплитуды наблюдается у озера Сент-Клэр, которое имеет наименьший из всех Великих озер объем воды и наименьшую среднюю глубину (рис. 2). Очевидно, что водоем с большей массой воды проявляет себя более инертно в процессах нагрева (испарения) и охлаж-

дения, установления ледового покрова и его таяния.

Динамику наполнения и разгрузки Великих озер за длительный период наблюдений исследовали, используя показатель ежемесячного отклонения уровня от среднего за год к средней глубине – V/S . Положительное значение параметра свидетельствует об увеличении уровня – наполнении водоема (табл. 2).

Таблица 2

Результаты анализа продолжительности наполнения Великих озер

Водоем	Продолжительность заполнения, мес.
Верхнее	С середины мая по декабрь $T = 6,5$
Мичиган, Гурон	С середины апреля по октябрь $T = 5,5$
Сент-Клэр	С апреля по октябрь $T = 6$
Эри	С середины марта по середину сентября $T = 6$
Онтарио	С середины марта по сентябрь $T = 5,5$

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что продолжительность наполнения для всех Великих озер приблизительно одинакова и составляет около 6 месяцев. У водоемов, имеющих зарегулированный сток, параметр «продолжительность наполнения» и размещение его в пределах годового интервала имеет большое значение. Например, дополнительный сброс воды в течение этого интервала может привести к неоправданному снижению уровня воды в водоеме. Вероятно, что параметр «продолжительность наполнения» является характеристикой каждого водоема.

Природа существования гармоник с периодами 4 и 6 месяцев для рассмотренных нами гидрологических параметров, по-видимому, определяется климатическими особенностями района водосбора системы Великих озер. Возможно, что в течение года с выявленной периодичностью происходят природные или техногенные процессы, обуславливающие эти закономерности.

Длительный характер наблюдений, на протяжении более 150 лет для уровней воды, во многом определяет надежность полученных результатов. Закономерности, выявленные в результате проведенных исследований, согласуются с результатами исследований процессов динамики уровней Великих североамериканских озер, выполненных рядом авторов [8].

Колебания уровней, по-видимому, отражают глобальные климатические процессы в Северном полушарии, и поэтому полученные результаты являются актуальными не только для североамериканского континента, но и для Евразии, включая территорию России.

Заключение

Исследования рядов наблюдений за уровнями воды озер Верхнее, Мичиган (Гурон), Сент-Клэр, Эри и Онтарио с помощью анализа Фурье за временной интервал с начала наблюдений по 2012 г. позволили установить, что для гармонических составляющих относительного помесечного изменения объема воды существуют периоды 3, 4, 6 и 12 месяцев.

Время наполнения для всех Великих озер приблизительно одинаково и составляет около 6 месяцев. Следует отметить, что для водоемов, которые имеют зарегулированный сток, параметр «продолжительность наполнения» и размещение его в пределах годового интервала имеет большее значение.

Амплитуды годовых гармоник колебаний уровней воды в Великих озерах тем больше, чем меньше объем воды или средняя глубина водоема.

Авторы выражают искреннюю благодарность и признательность кандидату физико-математических наук П.А. Жарову,

докт. хим. наук. А.А. Пичугину, канд. биол. наук Т.Г. Ослиной за оказанную помощь и ценные рекомендации при подготовке настоящей статьи.

Список литературы

1. Воейков А.И. Колебания климата и уровня озер Туркестана и Западной Сибири // Метеорологический вестник. – 1901. – № 3. – С. 16–27.
2. Кривенко В.Г. Концепция природной циклики и некоторые задачи хозяйственной стратегии России // BioDat. – 2002. – URL: <http://www.biodat.ru>.
3. Рогачева И. К. О проблеме прогноза изменений климата земли // Климат и природа. – 2012. – № 1. – С. 3–9.
4. Садовников В.И. Современное состояние и пути решения проблем Теченского каскада водоемов / В.П. Садовников, Ю.В. Глаголенко, Е.Г. Дрожко и др. // Вопросы радиационной безопасности. – 2002. – № 1. – С. 3–14.
5. Смагин А.И. Экология промышленных водоемов предприятия ядерного топливного цикла на Южном Урале. – Озерск: Редакционно-издательский центр ВРБ, 2007. – 190 с.
6. Смагин А.И. Экология водоемов в зоне техногенной радионуклидной геохимической аномалии на Южном Урале. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 205 с.
7. Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. – Л.: Наука, 1969. – С. 244.
8. Fortin V., Gronewold A.D. Water Balance of the Laurentian Great Lakes. Eds. Lars Bengtsson, Reginald W. Herschy and Rhodes W. Fairbridge // Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. Encyclopedia of Earth Sciences Series 10.1007/978-1-4020-4410-6_268. Springer Science+Business Media B.V. – 2012. – P. 864–869.
9. Great lakes environmental research laboratory [Electronic resource]. – URL: <http://www.glerl.noaa.gov/data>.
10. Microsoft Office Excel version 2007 [Electronic resource]. – 2007. – URL: <https://www.microsoft.com>.