

УДК 910:911

© В. А. РУМЯНЦЕВ, Ю. А. ТРАПЕЗНИКОВ

ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Климатические циклы давно привлекают к себе внимание исследователей, и вместе с тем для многих циклов механизмы, обуславливающие их формирование, до конца не поняты. Сказанное в полной мере относится к короткопериодным климатическим циклам, которые, очевидно, непосредственно связаны с внешним воздействием на климатическую систему. В работе сделана попытка рассмотрения короткопериодных климатических циклов как вынужденной реакции климатической системы на гравитационное воздействие планет Солнечной системы на Землю.

Поставленная задача решается в два этапа. На первом этапе определяются циклы среднегодовых значений вектора силы гравитационного притяжения Земли планетами Солнечной системы. На втором — исследуются циклы межгодовой изменчивости среднегодовых климатических показателей — температуры воздуха и атмосферных осадков с позиций отклика климатической системы на гравитационное воздействие планет Солнечной системы. Межгодовая изменчивость среднегодовых характеристик гидрологических процессов рассматривается как вынужденная реакция гидрологической системы на изменение режимобразующих факторов (температуры, осадков). Согласованность периодов межгодовой изменчивости среднегодовых показателей гидрометеорологических процессов с периодами межгодовой изменчивости среднегодовых параметров гравитационного воздействия планет позволяет судить о планетарной обусловленности рассматриваемых короткопериодных климатических циклов.

Циклы гравитационного воздействия планет на Землю. Планеты Солнечной системы вносят возмущения во взаимное гравитационное притяжение Солнца и Земли. Для расчета этих возмущений обратимся к таблице, в которой приведены численные значения параметров планет и их орбит. Возмущающая сила i -й планеты, выраженная в массах Земли $[m]$ и астрономических единицах [а.е.], имеет вид

$$f_i = \frac{m^2 m_i}{R_i^2},$$

где m_i — масса i -й планеты (в земных массах), $R_i = (R_{i,\max}, R_{i,\min})$ — максимальное или минимальное расстояния i -й планеты от Земли, в расстояниях Земли от

Солнца [а.е.]. Размерность силы f_i равна $m^2/(a.e.)^2$. Максимум модуля вектора возмущения, направленного от Земли к Солнцу, наступает, когда внешние планеты (Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон) находятся в соединении за Солнцем, а внутренние (Меркурий, Венера) — в ближнем соединении с Солнцем. Такая конфигурация для первых шести планет показана на рис. 1, а. Согласно данным таблицы, максимум модуля вектора возмущения, направленного от Земли к Солнцу, составляет $19.8 m^2/(a.e.)^2$. При конфигурации планет, когда Венера и Меркурий находятся в соединении за Солнцем, а внешние планеты (Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон) — в противостоянии, вектор их суммарного воздействия имеет противоположное от Солнца направление. Такая конфигурация планет показана на рис. 1, б. Согласно данным таблицы, модуль этого вектора равен $19.5 m^2/(a.e.)^2$. Таким образом, планеты Солнечной системы периодически примерно с одинаковой силой усиливают или ослабляют притяжение Земли Солнцем.

Наибольшее возмущение гравитационного воздействия на Землю создает Юпитер. Когда Юпитер находится в противостоянии с Солнцем, а все остальные планеты — в дальнем соединении с Солнцем, вклад этой планеты в 14.5 раза превышает вклад всех остальных планет. Минимальный вклад Юпитера в формирование приливообразующей силы соответствует конфигурации планет, когда в дальнем соединении с Солнцем находится только Юпитер. Он в 1.5 раза меньше суммарного воздействия всех планет. За Юпитером следует Венера. Ее роль в формировании приливообразующей силы при определенном расположении планет может стать преобладающей. Так, если все планеты находятся в дальнем соединении с Солнцем, а Венера — в ближнем, то ее вклад превышает суммарное воздействие всех остальных планет. Минимальное участие этой планеты в формировании возмущающей силы возникает, когда в дальнем соединении с Солнцем находится только Венера. В этом случае ее вклад в формирование возмущающей силы в 71 раз меньше вклада остальных планет. Третье место занимает Сатурн. Максимальное влияние этой планеты проявляется при таком расположении планет, когда Сатурн находится в противостоянии к Солнцу, а все остальные планеты — в дальнем соединении. При такой конфигурации вклад Сатурна в 6.6 раза меньше суммарного вклада остальных планет. При конфигурации планет, когда только Сатурн находится в дальнем соединении с Солнцем, его влияние в 21 раз меньше суммарного вклада всех остальных планет. Суммарный вклад трех дальних планет (Уран, Неп-

Основные параметры влияния планет на Землю

Планета	Расстояние от Земли, а. е.		Звездный период, лет	Синодический период, лет	Масса в массах Земли, m	Сила взаимного притяжения, $m^2/(a.e.)^2$	
	макс.	мин.				макс.	мин.
Меркурий	1.39	0.61	0.24	0.317	0.06	0.16	0.03
Венера	1.72	0.28	0.61	1.597	0.82	10.46	0.28
Марс	2.52	0.52	1.88	2.135	0.11	0.41	0.02
Юпитер	6.2	4.2	11.86	1.092	318	18.03	8.27
Сатурн	10.54	8.54	29.46	1.035	95.2	1.305	0.86
Уран	20.19	18.19	84.02	1.012	14.6	0.044	0.036
Нептун	31.07	29.07	164.78	1.006	17.2	0.020	0.017
Плутон	40.52	38.52	247	1.004	0.002	—	—

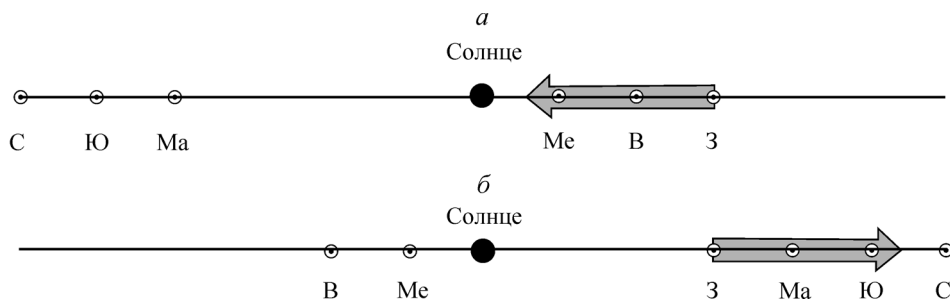


Рис. 1. Конфигурации планет, соответствующие максимальным отклонениям Земли к Солнцу (а) и от Солнца (б).

З — Земля, Ме — Меркурий, В — Венера, Ма — Марс, Ю — Юпитер, С — Сатурн.

тун, Плутон) не превышает 0.33 % вклада всех планет. Влияние Плутона на Землю практически не ощущается.

Подводя итог анализа таблицы, отметим решающую роль Юпитера и Венеры в формировании возмущающего воздействия на Землю.

Обратимся к закономерностям временной изменчивости возмущающего воздействия планет на Землю. На рис. 2, а приведен временной ряд вектора внешнего воздействия на Землю 5 планет (Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн)

$$F_1 = \sum_{i=1}^5 \frac{m^2 m_i}{r_{i,t}^2},$$

где m_i — масса i -й планеты, выраженная в массах Земли, $r_{i,t}$ — расстояние от Земли до i -й планеты в момент времени t . Расчеты проводились в круговом приближении орбит Земли и планет, суточное вращение Земли вокруг своей оси не учитывалось. За начальное расположение планет принята их конфигурация в соответствии с рис. 1, б. Знак (-) соответствует направлению вектора силы от Солнца, знак (+) — дополнительному притяжению Земли к Солнцу. Анализ графика на рис. 2, а показывает наличие следующих трех циклов.

Наиболее четко проявляется 1.092-летний (13.1 мес) цикл, который однозначно идентифицируется по минимальным значениям приливообразующей силы F_t . Этот цикл полностью совпадает с синодическим периодом Юпитера, который, согласно таблице, равен 1.092 лет. Совпадение этих периодов является следствием того, что основное внешнее воздействие на Землю оказывает Юпитер.

По максимальным значениям F_t хорошо идентифицируется квазитрех-летняя цикличность (более точно 3.2 лет). Этот цикл имеет устойчивое 6-кратное повторение в течение 19.2 лет. Затем происходит сбой ритма, за которым следует следующее 6-кратное повторение 3.2-летнего цикла. Появление этого цикла обусловлено суммарным воздействием на Землю Юпитера и Венеры. Действительно, суммы двух гармоник с синодическими периодами Юпитера относительно Земли $T_{юз} = 1.092$ лет и Венеры относительно Юпитера $T_{юв} = 0.649$ лет создают эффект модуляции несущего цикла с периодом

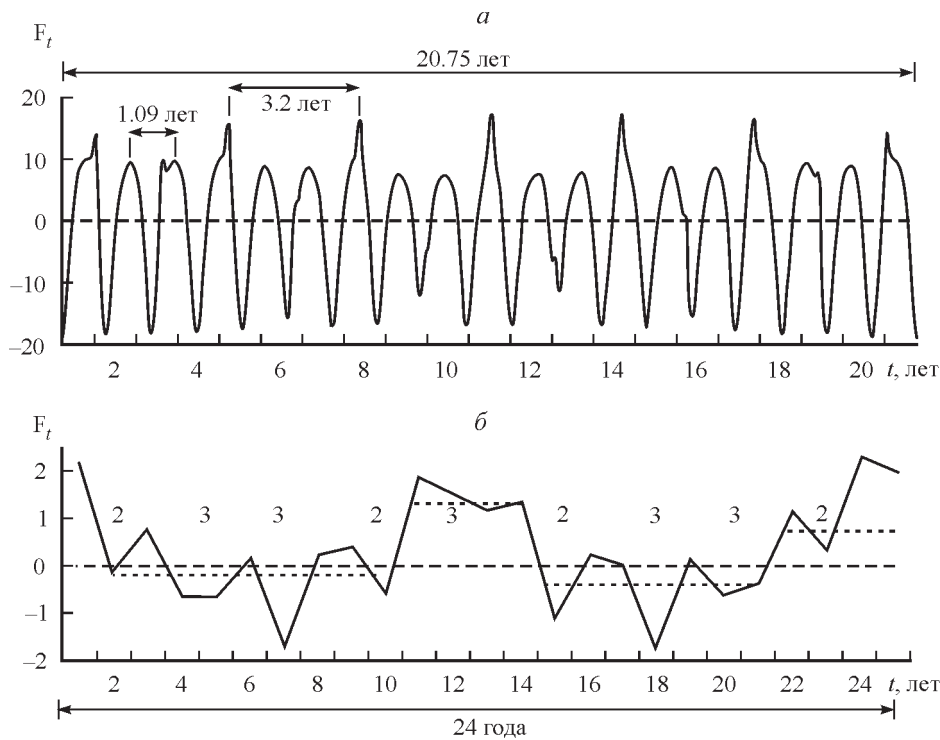


Рис. 2. Сила гравитационного воздействия планет на Землю при дискретности 0.5 мес (а) и при дискретизации и осреднении 1 год (б).

Отрицательные значения соответствуют отклонению планетами Земли от Солнца, положительные — дополнительному притяжению Земли к Солнцу. Цифры показывают продолжительности (лет) характерных циклов.

$$2 \frac{T_{\text{ЮЗ}} T_{\text{ЮВ}}}{T_{\text{ЮЗ}} - T_{\text{ЮВ}}} = 3.2 \text{ лет.}$$

Не так ярко выражен почти 20-летний период (более точно 20.75 лет). В основном этот цикл характеризуется тем, что внутри него форма 13.1-месячного цикла меняется асимметрично. На рис. 2 видно, что профиль центрального 13.1-месячного цикла практически симметричен относительно вертикали, т. е. время его полупериода от минимума до максимума совпадает со временем его полупериода от максимума до минимума: $\tau_{\text{min}}^{\text{max}} : \tau_{\text{max}}^{\text{min}} = 1:1$. Для первого цикла отношение этих полупериодов составляет: $\tau_{\text{min}}^{\text{max}} : \tau_{\text{max}}^{\text{min}} = 2.7:1$, а для последнего — $\tau_{\text{min}}^{\text{max}} : \tau_{\text{max}}^{\text{min}} = 1:2.7$. Численные расчеты показали, что 20.75-летний цикл появляется в результате совместного воздействия всех планет. Действительно, если обратимся к синодическим периодам планет относительно Земли и Солнца (данные таблицы), то легко рассчитать, что повторение исходной конфигурации планет произойдет ровно через 20.75 лет, при этом на период этого цикла приходятся 13-й обгон Земли Венерой (20.76 лет), 19-й обгон Юпитера Землей (20.75 лет), 20-й обгон Сатурна Землей (20.7 лет). Звездные периоды Меркурия и Марса близки к гармоникам основного периода Юпитера. Так, период Меркурия в 0.241 лет практически совпадает с 19-й гармоникой Юпитера

(0.242 лет), а период Марса в 1.88 лет близок к 6-й гармонике Юпитера. Поэтому их совместное участие в создании внешнего воздействия на Землю проявляется в основном в формировании формы трех указанных циклов.

Обобщенный портрет гравитационного воздействия планет на Землю выглядит следующим образом. Основное колебание с периодом 1.092 лет непосредственно связано с воздействием Юпитера. Это колебание модулировано по амплитуде с периодом 3.2 лет. Эффект амплитудной модуляции обусловлен суммарным воздействием Юпитера и Венеры. Вклад Сатурна и всех остальных планет создает эффект фазовой модуляции основного несущего сигнала с периодом в 20.75 лет.

Как правило, анализ межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов проводится по их временным рядам с осреднением и дискретизацией данных в 1 год. Для того чтобы сравнивать климатические циклы с циклами гравитационного воздействия планет, необходимо рассмотреть закономерности трансформации ряда F_t , приведенного на рис. 2, а, в ряд $\bar{F}_t$, полученного из него в результате применения операций годового осреднения и дискретизации. При использовании процедуры дискретизации необходимо соблюдать условия, при которых исходный процесс может быть восстановлен по своим дискретным отсчетам без потери какой-либо информации о нем. По теореме Котельникова для этого необходимо, чтобы на период значимой высокочастотной составляющей процесса F_t приходилось не менее двух отсчетов. Поскольку вклад планет в суммарное гравитационное воздействие на Землю определяется их синодическими периодами (синодический период двух планет — время обгона одной планеты другой в их совместном вращении вокруг Солнца), то, как следует из таблицы, в которой приведены синодические периоды планет относительно Земли и Солнца, условию теоремы Котельникова не удовлетворяет ни один синодический период планет. Это означает, что среднегодовой ряд $\bar{F}_t$ в принципе не может адекватно отражать закономерности межгодовой изменчивости ряда F_t , т. е. ряд среднегодового модуля $\bar{F}_t$ должен существенно исказить циклы исходного процесса F_t . Этот эффект известен в спектральном анализе временных рядов как явление aliasing (перераспределение частот) [4]. Для иллюстрации этого эффекта обратимся к рис. 2, б, на котором приведена последовательность среднегодовых значений вектора силы $\bar{F}_t$, полученная годовым осреднением данных рис. 2, а. На рисунке видно, что 3.2-летний цикл ряда трансформировался в последовательность чередующихся 2- и 3-летних колебаний, оцифрованных на графике. Средняя продолжительность этих колебаний составляет 2.7 лет. Вместо 20.75-летнего цикла образовался 24-летний цикл, состоящий из фаз с преимущественным притяжением Земли к Солнцу, которые сменяются фазами преимущественного отклонения Земли от Солнца.

Таким образом, в результате годовых осреднения и дискретизации исходного ряда реально существующие 1.092- 3.2- и 20.75-летний циклы ряда F_t трансформировались в «ложный» 24-летний цикл ряда $\bar{F}_t$, состоящий из последовательности не существующих в природе 2- и 3-летних колебаний. Это означает, что при физической интерпретации циклов ряда $\bar{F}_t$ следует включать процедуру перехода от мнимых циклов ряда $\bar{F}_t$ к реальным циклам гравитационного воздействия планет на Землю.

Циклы гидрометеорологических процессов. Каким должен быть отклик различных климатических систем на рассматриваемое внешнее воздействие планет? Если система безынерционна к внешнему воздействию, то ее компо-

ненты будут содержать те же циклы, что и возмущающая сила. В общем случае инерционность климатических подсистем к внешнему воздействию или их собственные движения (такие как общая циркуляция атмосферы и глобальная циркуляция Мирового океана) будут «растягивать» рассмотренные выше циклы внешнего воздействия. К этому следует добавить, что поскольку направление суточного вращения Земли и направление вращения планет вокруг Солнца совпадают, то существует доплеровский эффект «растяжения» периодов циклов возмущающего воздействием планет. В силу указанных причин при анализе межгодовой изменчивости конкретных природных процессов следует ожидать разнообразия в численных оценках периодов планетарно обусловленных циклов.

Достаточно часто анализ межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов выполняется по их временным рядам с дискретностью и осреднением в 1 год. Привлекательность такого приема заключается в том, что при указанных процедурах дискретизации и осреднения полностью фильтруется годовая ритмика. Можно утверждать, что в стационарном климате, т. е. при отсутствии долгопериодных трендов и изменения структуры годичного цикла, ряды среднегодовых данных в основном содержат информацию о циклах, обусловленных воздействием планет.

Проиллюстрируем это утверждение на примере гидрометеорологической системы «Температура воздуха и осадки в Санкт-Петербурге—уровень воды Ладожского озера». На рис. 3 *а, б* приведены временные ряды среднегодовых температур воздуха и годовых сумм осадков в Санкт-Петербурге, соответствующие временным интервалам их инструментальных измерений: 1765—2008 гг. для температуры, 1836—2008 гг. для осадков. На представленных рисунках достаточно ярко выражены долгопериодные тренды в рядах температуры и осадков, обусловленные долговременными изменениями годичного цикла рассматриваемых климатических показателей. На фоне долгопериодных трендов основной вклад в межгодовую изменчивость рассматриваемых климатических показателей связан с чередованием 2- и 3-летних колебаний. Средние периоды этих колебаний равны 2.8 лет для температуры и 2.9 лет для осадков. Следующей характерной чертой рассматриваемых временных рядов является чередование достаточно продолжительных фаз повышенной и пониженной среднегодовой температуры (рис. 3, *а*), увеличения и уменьшения годовых сумм осадков (рис. 3, *б*). Полный цикл смены этих фаз для температуры и осадков происходит за 29 лет. Смена фаз повышения (понижения) среднегодовой температуры и увеличения (уменьшения) годовых осадков происходит не синхронно. Как правило, на фазу повышения (понижения) среднегодовой температуры приходятся части фаз увеличения и уменьшения осадков.

Сравнение периодов выделенных климатических циклов (2.8—2.9 лет и 29 лет) с соответствующими циклами гравитационного воздействия планет (2.7 и 24 лет) свидетельствует о их близости с учетом ожидаемого эффекта «растяжения» периодов гравитационного воздействия планет. Это «растяжение» периодов вполне укладывается в расчетные оценки доплеровского эффекта.

Уровень воды в озере формируется под воздействием температуры и осадков. Поэтому в межгодовой изменчивости уровня следует ожидать циклы, идентичные циклам межгодовой изменчивости режимобразующих факторов. Однако из-за инерционности отклика уровня озера на изменение температурно-влажностного режима периоды циклов уровня озера должны «растягиваться». На рис. 3, *в* приведен ряд среднегодовых значений уровня Ладожского озера. Структура межгодовых колебаний уровня озера идентична изменчивости

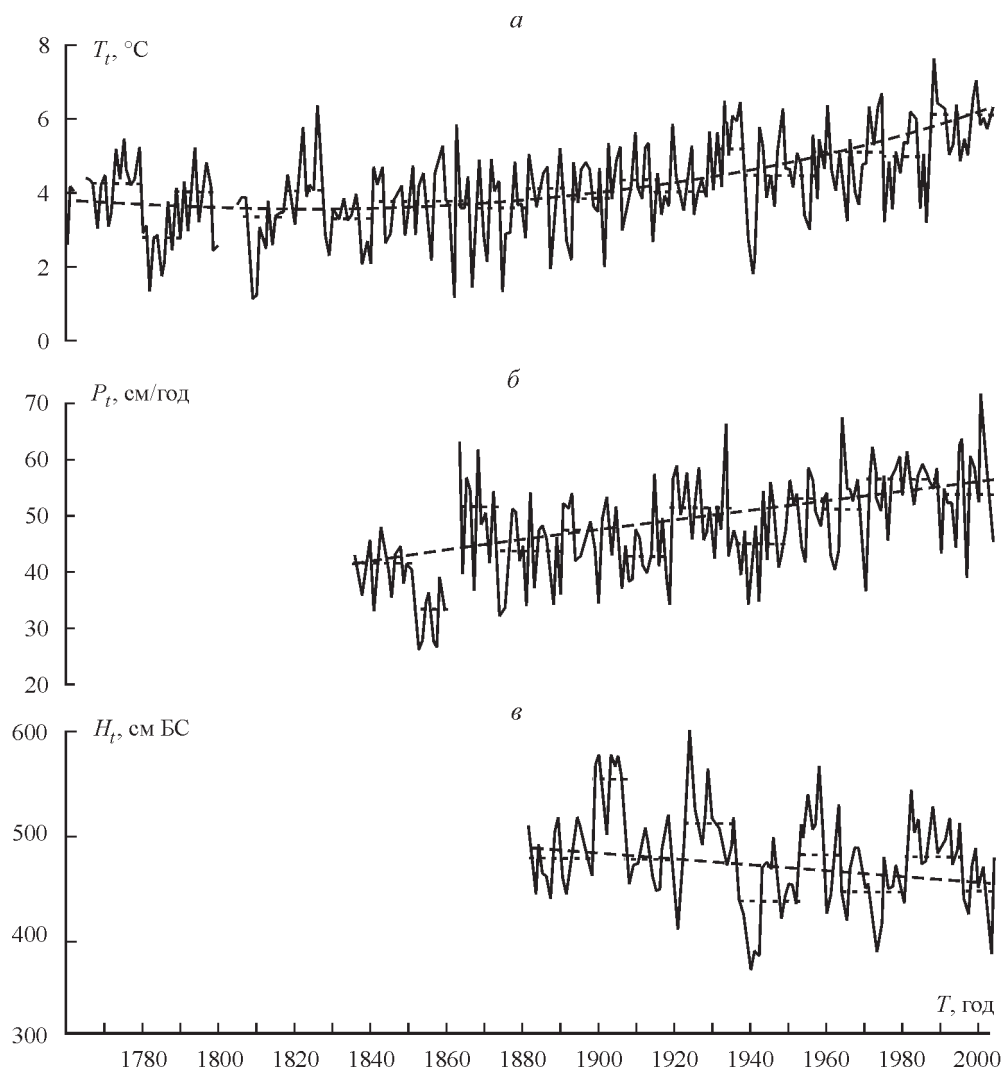


Рис. 3. Циклы межгодовой изменчивости годовых значений температур (*a*) и осадков (*б*) в Санкт-Петербурге, уровня Ладоги (*в*).

его режимообразующих факторов — температуры воздуха и осадков. Наибольший вклад в межгодовую изменчивость приносят короткопериодные 2- и 3-летние колебания и их 5-летняя суперпозиция. Средняя продолжительность короткопериодных колебаний составляет 4 года. Сравнение идентичных колебаний на рис. 3 показывает, что период короткопериодных колебаний режимообразующих факторов (2.8 лет) существенно отличается от аналогичных колебаний уровня озера (4 года). Объяснение этого ранее установленного эмпирического факта было дано в работах [7,8]: если рассматривать уровень озера как выход динамической системы, на вход которой подаются температура и осадки, то из-за инерционного отклика уровня на изменение температурно-влажностного режима периоды циклов выхода динамической системы (уровня воды в озере) будут превышать периоды циклов входного воздействия (температуры и осадков).

Характерной чертой межгодовой изменчивости уровня озера является чередование многоводных и маловодных фаз [3, 8]. На рис. 3, в обозначены средние значения многоводных и маловодных фаз водности Ладожского озера. Средняя продолжительность полного цикла, содержащего маловодную и многоводную фазы, составляет 29 лет, смена фаз водности уровня и осадков осуществляется почти когерентно. В некоторых случаях происходит запаздывание изменения уровня по отношению к изменению режима водности осадков на 1—2 года.

Рассмотренный пример, иллюстрируемый рис. 3, наглядно демонстрирует единство циклов внешнего воздействия планет Солнечной системы на Землю с циклами климатических параметров (температуры воздуха и осадков) и гидрологических процессов (уровня воды в озере).

На настоящий момент существует множество публикаций, в которых сообщается о наличии рассматриваемых короткопериодных циклов в рядах среднегодовых значений гидрометеорологических процессов [1—3, 5—6]. Так, в работе [8] анализ оценок спектров годового стока рек Европы, расположенных в широтной зоне 51—69° с. ш., показал наличие спектральных максимумов на периодах порядка 4 лет. В работах [1, 2] достаточно убедительно показан 30-летний цикл по временным рядам стока рек и уровня озер. Автор этих работ считает, что этот цикл обусловлен электромеханическим излучением Солнца и планет-гигантов: Юпитера и Сатурна. Назвав правильно источник внешнего воздействия, автор ошибся в формулировке механизма формирования цикла.

ВЫВОДЫ

Выполненный расчет гравитационного воздействия планет Солнечной системы на Землю показал, что модуль возмущающей силы F_i в обобщенном виде можно представить в виде основного несущего колебания в 13.1 мес, модулированного по амплитуде с периодом в 3.2 лет, а по фазе — с периодом 20.75 лет. При дискретизации и осреднении возмущающей силы с интервалами в 1 год ряд среднегодовых значений возмущающей силы $\bar{F}_i$ принимает вид чередующихся 2- и 3-летних колебаний на фоне 24-летнего цикла чередования фаз преимущественного притяжения (или отклонения) планетами Земли к Солнцу (или от Солнца).

При изучении механизма влияния планет на формирование временной изменчивости гидрометеорологических процессов необходимо учитывать как инерционность этих процессов к внешнему воздействию, так и доплеровский эффект, обусловленный вращением Земли. Эти факторы в разных геосистемах по-разному «растягивают» несущие 13.1-месячные колебания и их фазово-амплитудные модуляции.

При изучении закономерности межгодовых колебаний гидрологических процессов по их среднегодовым рядам выделяются не существующие в природе F_i квази 2—4-летние и квази 30-летние циклы. Для установления причинно-следственных связей возможного воздействия планет на формирование изменчивости гидрологических процессов необходим дополнительный этап анализа, устанавливающий переход к реально существующим циклам и факторам, формирующих их.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проектам 10-05-00109-а, 10-05-00412-а.

Список литературы

- [1] *Леонов Е. А., Леонов В. Е.* Концепции и методы сверхдолгосрочных прогнозов речного стока // Сб. работ по гидрологии. 1990. № 21. С. 45—62.
- [2] *Леонов Е. А.* Космос и сверхдолгосрочный прогноз. СПб.: Алтейя, Наука, 2010. 352 с.
- [3] *Малинина Т. И.* Водный баланс Ладожского озера // Гидрометеорологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л.: Изд-во ЛГУ, 1966. С. 182—203.
- [4] *Марпл С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
- [5] *Монин А. С., Шишков Ю. А.* История климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 408 с.
- [6] *Монин А. С., Сонечкин Д. М.* Колебания климата. Наука, 2005. 248 с.
- [7] *Румянцев В. А., Трапезников Ю. А., Григорьев А. С.* Стохастические модели влияния климата на гидрологию озер. СПб.: НИИ химии СПбГУ, 2001. 156 с.
- [8] *Румянцев В. А., Трапезников Ю. А.* Стохастические модели гидрологических процессов. СПб.: Наука, 2008. 152 с.

Санкт-Петербург
lake@limno.org.ru

Поступило в редакцию
8 ноября 2011 г.

Изв. РГО. 2012. Т. 144. Вып. 3

© **Н. Н. АЛЕКСЕЕВА, О. А. КЛИМАНОВА**

СОВРЕМЕННЫЕ ЛАНДШАФТНО-ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТРОПИКОВ И ИХ ГЛОБАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Современное состояние исследований тропической области. Тропические территории, несмотря на свою удаленность от России, издавна входили в сферу научных интересов российских естествоиспытателей. Богатые традиции исследования тропиков связаны с Русским географическим обществом: Н. И. Вавилов, Н. В. Каульбарс, Н. Н. Миклухо-Маклай, А. Е. Снесарев и многие другие внесли существенный вклад в мировую науку, изучая природные и этнографические особенности тропических регионов. В советский период комплексные физико-географические исследования тропической области особенно плодотворно развивались с конца 1950-х по 1980-е гг., когда были опубликованы фундаментальные работы Е. Н. Лукашовой (1958), Л. И. Кураковой (1964), В. М. Фридланда (1964), Н. А. Гвоздецкого (1960, 1970), С. В. Зонна (1970, 1974), Г. М. Игнатьева (1979), А. Г. Воронова (1980), М. Б. Горнунга (1984) и других географов, посвященные природе тропиков. С сожалением можно констатировать, что за последние 20 лет комплексных монографий, посвященных географическим особенностям тропиков, в нашей стране практически не издавалось. Наиболее многочисленны публикации по тропической метеорологии, научная школа которой развивается на географическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова. Успешно действует Совместный Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр по изучению сложноорганизованных тропических экосистем. Региональные вопросы управления природными ресурсами тропиков нашли отраже-