

ПЕРИОДИЧНОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ, ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОЗЕРНОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА ЮГЕ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

Ф. Н. Лисецкий,

профессор кафедры природопользования и земельного кадастра

Белгородского государственного национального исследовательского университета, liset@bsu.edu.ru,

В. Ф. Столба,

профессор университета г. Орхус (Дания), klavs@hum.au.dk,

В. И. Пичура,

доцент Херсонского государственного аграрного университета (Украина), pichura@yandex.ru

Фурье-анализ непрерывного ряда наблюдений за расходами воды в реке Днепр (188 лет) позволил установить качественно различные периоды формирования стока и циклическую составляющую в 12,5 лет. С помощью кусочно-регрессионных моделей, которые позволяют определить вклад годовых сумм осадков и температуры воздуха в формирование речного стока, выявлена климатическая обусловленность гидрологических процессов. Установлено, что существенный рост годовых сумм атмосферных осадков с 1940-х гг. не привел к увеличению водности Днепра, что свидетельствует о снижении сенсорности гидрологических циклов на климатическую ритмику как результат доминирующего антропогенного воздействия. В этой связи обоснован оптимальный для целей моделирования период формирования водности Днепра (1900—1946 гг.), который наиболее адекватно отражает в речном стоке действия природных климатических факторов. Регрессионная модель для условий с расходом воды более $1686 \text{ м}^3/\text{с}$ может быть использована для прогноза (и ретрогноза) экстремальных гидрологических событий на юге Восточно-Европейской равнины по толщине донных отложений Сакского озера.

Based on a Fourier analysis of a continuous series of observations (188 years) of the water discharge in the Dnieper River, the study has identified qualitatively distinct periods of the discharge formation and a cyclicity constituent of 12.5 years. By means of the piece regression models, which make it possible to define the contribution of annual sums of precipitation and air temperature to the riverine discharge, the study has established the climatic dependence of the hydrological processes. It has also demonstrated that an essential increase in the annual precipitation sums since the 1940s did not result in an increase in the water volume in the Dnieper River. This suggests that the declining sensitivity of the hydrological cycles to the climatic rhythms is the effect of a strong man-made impact. Accordingly, the Dnieper water-volume formation period (1900—1946) optimal for simulation has been defined, which most accurately reflects the impact of natural climatic factors on the riverine discharge. The regression model for the conditions when the water discharge is over $1686 \text{ m}^3/\text{s}$ can be used for prognosis (and retrognosis) of extreme hydrological events in the south of the East-European Plain based on the thickness of the bottom sediments of Lake Saki.

Ключевые слова: природная ритмика, климатические изменения, речной сток, донные отложения озер, река Днепр, Сакское озеро, нейронные сети.

Keywords: natural rhythms, climate changes, riverine discharge, lacustrine sediments, Dnieper River, Lake Saki, neural network.

Введение. Адекватные представления о ритмике природных процессов могут быть сформированы, если наряду с изучением направленности (тренда) процессов могут быть поняты их сложные квазипериодические компоненты, особенно длиннопериодические, которые особенно важны для прогностических целей. Для целей генетического моделирования и прогноза изучение системы «атмосферные осадки — речной сток — донные отложения» имеет то преимущество, что причинно-следственные связи в этой системе более однозначны, чем, к примеру, при проведении дендроэкологических исследований, где имеют место инерционность в биологических откликах, генерирование собственных циклов и персистентность временных рядов [1].

Качественно различные этапы термического режима европейского климата, которые были выявлены даже за относительно короткий период в 500 лет [2], несомненно, имеют низкочастотную повторяемость и не только в температуре воздуха, но и в вековых колебаниях условий увлажнения. Для региональной климатической системы юга Украины они установлены по связи атмосферных осадков и годовых слоев отложений в Сакском озере за последние 4000 лет [3]. Изучение вековой периодичности (40—140 лет) процесса почвообразования [4] показало, что с периодами усиления увлажнения связана активизация денудационных процессов, что должно найти свое отражение в процессах озерной седиментации.

Материалы и методы. Для определения общих закономерностей временного ряда, характеризующего расход воды реки Днепр (1821—2008 гг.), фактические значения были преобразованы с использованием «4253Н фильтра». Этот метод фильтрации дает возможность получить сглаженный ряд, сохраняя при этом основные характеристики эмпирического ряда. В результате Фурье-анализа определена ясно выраженная циклическая составляющая временного формирования речного стока и установлены

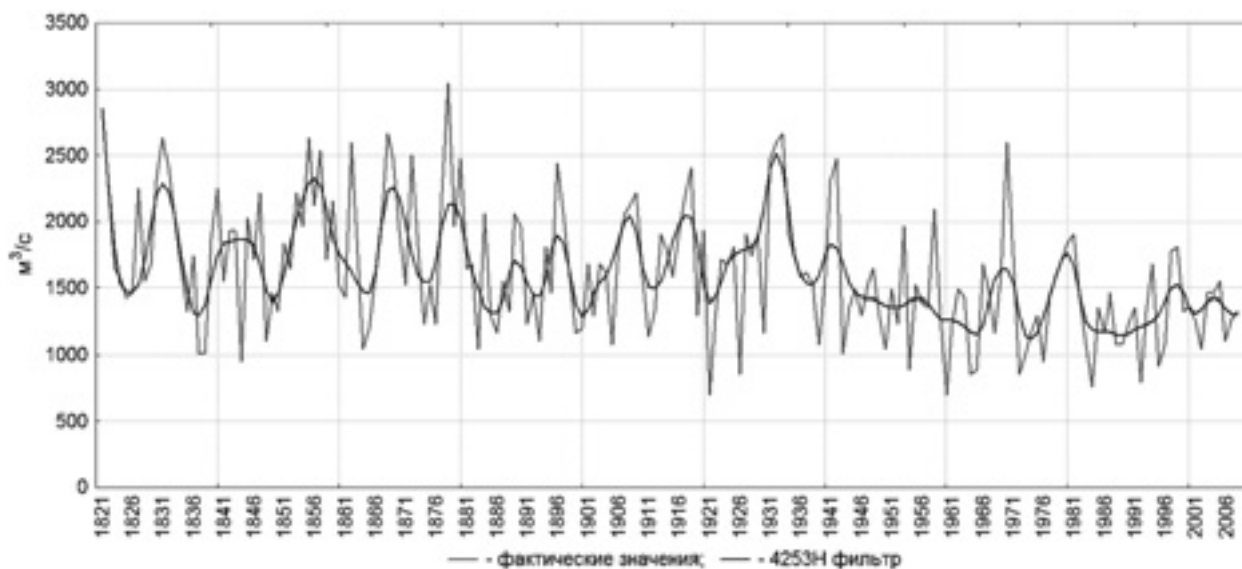


Рис. 1. Годовая динамика расхода воды реки Днепр (1821—2008 гг.) и сглаженный ряд с использованием 4253H фильтра

наибольшие значения периодограммы (значимые частоты циклических составляющих временного ряда). Для ранжирования и оценки влияния климатических факторов (данные метеостанций Херсон и Симферополь) на сток Днепра создана обобщенная регрессионная нелинейная нейронная сеть — GRNN(2-218-2-1): производительность обучения — 0,283, контрольная — 0,382, тестовая — 0,429; погрешности обучения — 0,0006, контрольная — 0,0007, тестовая — 0,0009. Методика использования искусственных нейронных сетей в гидрологических целях изложена ранее [5]. Климатическую обусловленность гидрологических процессов изучали с помощью кусочно-регрессионных моделей.

Гидрологический ряд наблюдений инструментального периода на р. Днепр интересно сопоставить с уникальной по длительности варвохронологией Сакского озера (площадь озерной котловины — 9,7 км², зеркала — 8,9 км², площадь водосбора — 209 км², соленость — 10,5 %), которое находится в 190 км к югу от низовья Днепра. Из всех крымских озер именно Сакскому посвящено наибольшее количество работ. Это озеро, будучи одним первых в России бальнеологических курортов, а также центром развития соляной и химической промышленности, стало объектом подробного изучения [3, 6—9 и др.]. Полное обособление Сакского озера произошло около 5200 лет назад [9]. Исследование колонок (мощностью до 4,2 м) его донных отложений и радиоуглеродное датирование макроостатков по методу AMS

открывает возможности хронологической корреляции между масштабными колебаниями климата (чередование влажных и сухих циклов), с одной стороны, и основными этно-историческими и экономическими процессами, характеризовавшими историю Северного Причерноморья, с другой [8].

Результаты и обсуждение. Обработка синхронных рядов наблюдений за осадками по метеостанциям Херсон и Симферополь (1900—2003 гг.) с помощью одномерного анализа Фурье показала, что наиболее устойчивыми периодами внутривековых колебаний увлажнения являются 20,4 и 14,6 лет, соответственно. Зависимость циклических составляющих двух рядов динамики осадков, которую оценивали по значению когерентности (квадрату корреляции между циклическими компонентами двух рядов соответствующей частоты), наилучше проявляется при периоде в 9,3 года.

С помощью сглаженного ряда наблюдений за расходом воды в р. Днепр (рис. 1) выявлена тенденция снижения годового стока, которая отмечена с начала 40-х годов, а с 1946 г. под воздействием зарегулирования стока и антропогенной нагрузки определен период нестационарности [10]. В результате анализа закономерностей временного ряда нами установлено два периода формирования водности р. Днепр: I период (стабильный) — 1821—1946 гг.; II период (зарегулирование реки) — 1947—2008 гг. Во второй период среднее значение стока составило 1350 м³/с, что на 23,2 % меньше среднего значения первого периода (1757 м³/с).

Анализ разностной интегральной кривой модульных коэффициентов годового стока Днепра за последние 188 лет [10] показал, что после 1942 г. началась новая маловодная фаза многовекового цикла.

В результате Фурье-анализа определена циклическая составляющая временного формирования стока Днепра, которая для общего ряда составила 12,53 года. В первый период происходило стабильное природное циклическое формирование стока р. Днепр (12,6 года), а во второй период в результате усиления антропогенной нагрузки закономерности формирования стока были нарушены. Ряд сглажен с

небольшим визуальным проявлением циклической составляющей (3,88 и 10,33 года), что указывает на уменьшение доли влияния климатических факторов на динамику среднегодовой водности реки Днепра.

Трендовые кривые расхода воды и среднегодовой температуры воздуха пересекаются в 1942 г., после чего на фоне стабилизации низких величин расхода воды ($1300 \text{ м}^3/\text{с}$) отмечается резкий рост температур, особенно с 1990-х гг. Существенный рост годовых сумм атмосферных осадков с 1940-х гг. не привел к увеличению водности (рис. 2), что свидетельствует о снижении сенсорности гидроло-

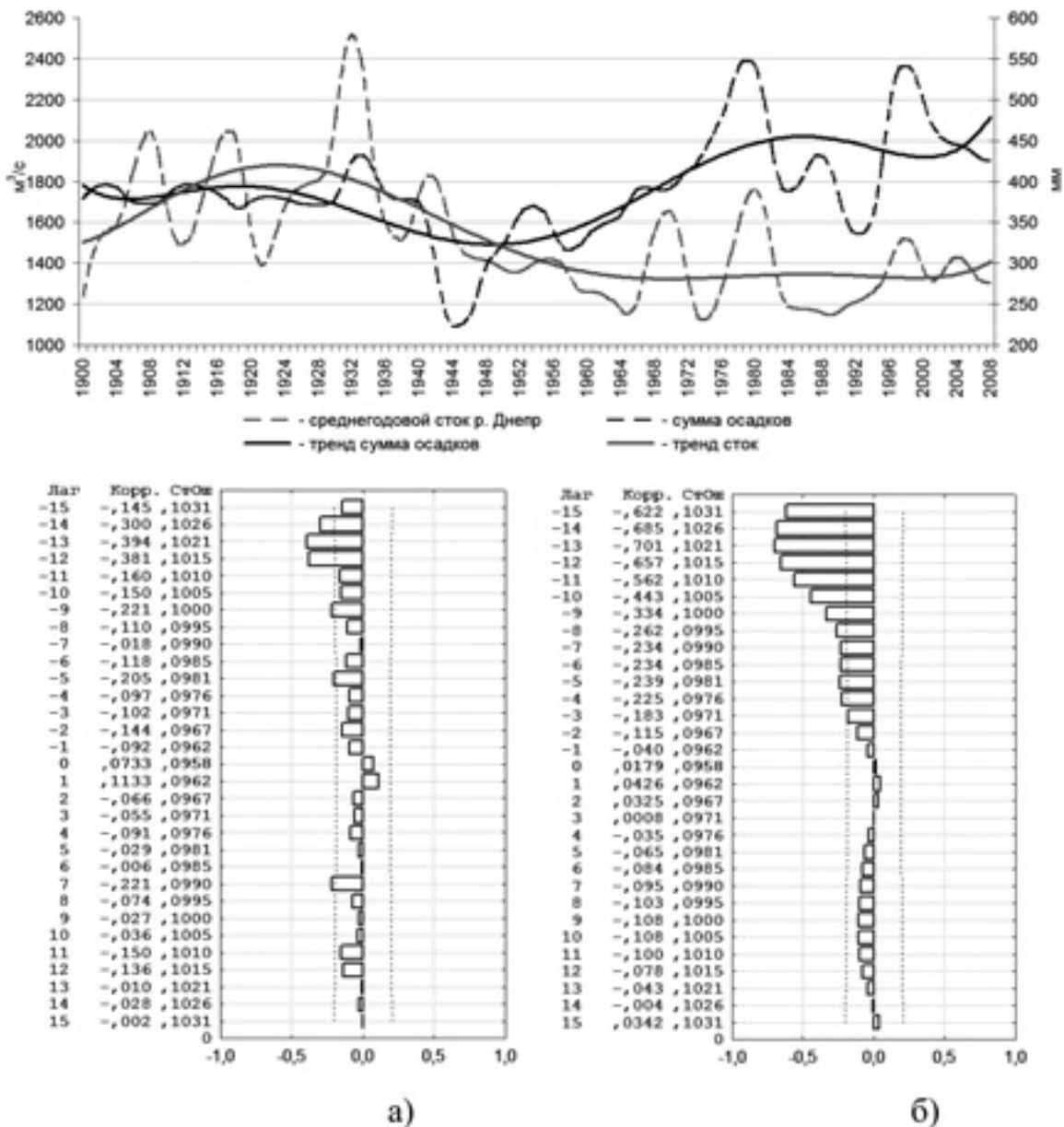


Рис. 2. Зависимость стока реки Днепр от суммы годовых осадков: а) исходный ряд; б) сглаженный ряд «4253H фильтр»

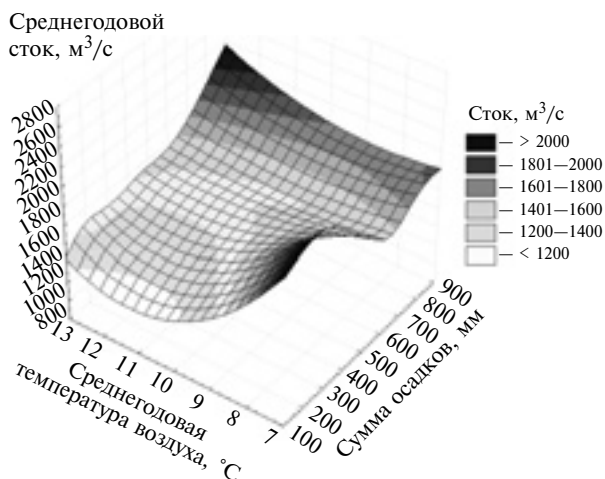


Рис. 3. Зависимость стока реки Днепр от климатических факторов

гических циклов на климатическую ритмику в результате доминирующего воздействия антропогенного фактора.

Коэффициент множественной корреляции с учетом нелинейных закономерностей влияния климатических факторов на среднегодовую динамику расхода воды составил 0,94. На протяжении 1900—2008 гг. можно выделить три варианта формирования стока реки Днепр (рис. 3):

1) при устойчивых максимумах осадков (600—900 мм) влияние температуры воздуха на формирование стока незначительно;

2) при выпадении осадков в пределах 150—500 мм проявляется активное отрицательное влияние температуры воздуха на формирование стока;

3) при минимальной среднегодовой температуре воздуха (7—8 °С) и сумме осадков (100—400 мм) в реке формируется положительный водный баланс.

Для оценки формирования динамики стока реки Днепр в зависимости от климатических факторов за период, который наиболее объективно отражает климатическую периодичность (1900—1946 гг.), использована кусочно-регрессионная модель вида

$$Y = \begin{cases} 1,392X_1 + 105,495X_2 - 163,061, & \text{if } 0 < Y \leq 1686,083, \\ 0,955X_1 - 157,485X_2 + 3145,989, & \text{if } Y > 1686,083, \end{cases} \quad (1)$$

где Y — среднегодовой расход воды реки Днепр, м³/с; X_1 — сумма осадков, мм; X_2 — среднегодовая температура воздуха, °С.

Таким образом, по уравнению (1) определены два условия формирования стока в зависимости от климатических факторов: 1) когда расход меньше или равен 1686 м³/с; 2) когда расход больше этой величины. В результате удалось выполнить моделирование влияния климатических факторов на динамику стока Днепра (рис. 4). Коэффициент корреляции влияния факторов на динамику стока реки составил 0,84. Объясненная доля дисперсии влияния факторов равна 0,70.

Это позволяет по реконструированным величинам речного стока, а сток р. Днепр уже послужил основой для восстановления ряда гидрологических событий прошлого на юге Русской равнины [11], объяснить интегральное влияние условий тепло- и влагообеспеченности территории.

Донные отложения представляют собой многокомпонентную систему, которая находится в динамическом равновесии с аутохтонными и аллохтонными компонентами, ее составляющими. В замкнутых лиманах процесс илообразования обусловлен взаимодействием климатических, геолого-гидрологических, физико-химических и биологических факторов. Но при наличии постоянного или временного водотока в верховье лимана основным аллохтонным компонентом являются влекомые и взвешенные речные наносы. Даже 200 лет назад в верховье Сакского озера, судя по карте Мухина (1816 г.), помимо хорошо выработанной речной долины длиной около 6 км, был также постоянный водный поток (1,5 км).

Путем сопоставления мощности годичных слоев в донных отложениях Сакского озера и суммы атмосферных осадков в Севастополе определено, что уменьшение интенсивности илонакопления совпадает с годами с недостаточным количеством осадков, а увеличение — с дождливыми годами [6]. Частота превышения нормы атмосферных осадков по метеостанциям Херсон и Симферополь (396 и 454 мм) составляет 59,2 и 51,5 % соответственно. На основе анализа многолетнего (>100 лет) ряда метеорологических наблюдений в ЦЧР один ливень высокой обеспеченности, т. е. повторяющийся не менее одного раза в теплый период года, с интенсивностью 20 мм/час, привел к выносу смытого материала, превышающего в 2,3 раза расчетные среднегодовые темпы смыва [12]. Очень важны представления о сериях многоводных лет, которые приводят к экологическим последствиям в геосистемах, не менее катастрофическим, чем разовые выдаю-

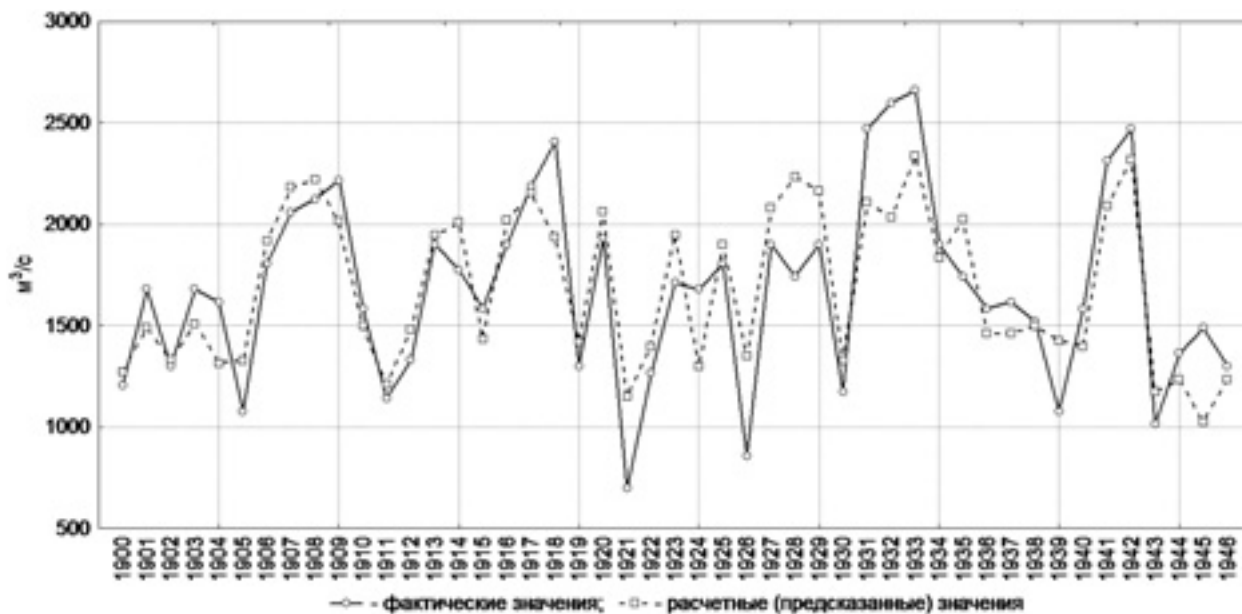


Рис. 4. Результаты моделирования влияния климатических факторов на динамику стока реки Днепр (I период)

щиеся события [7]. Как установлено ранее [6], величина годовых отложений ила в Сакском озере подвержена периодическим колебаниям, которые формируются путем суперпозиции простых периодических волн (3; 6; 11 и более лет) с различными амплитудами. За последние три века размах колебаний толщины иловых отложений, сглаженных по пятилетним скользящим средним, достигает трех раз, а за 4000 лет при сглаживании по пятидесятилетиям — до 12 раз.

Сток Днепра за период 1817—1872 гг. стал основой для восстановления гидрологических событий с 1700 г. Восстановление исходит из подтвержденной связи годовых расходов воды и толщины донных отложений Сакского озера. Донные отложения являются косвенным показателем изменений в региональной климатической системе. Нами, используя данные [7], установлена связь толщины донных отложений Сакского озера (D , мм/год) и годовых расходов воды в р. Днепр (W_r , м³/с):

$$D = 0,569 \cdot \exp(0,5328 \cdot W_r), \quad r = 0,69. \quad (2)$$

Из анализа уравнения (2) следует, что в среднем при изменении количества атмосферных осадков и, соответственно, расхода речных вод на 1000 м³/с скорость аккумуляции донных озерных отложений увеличивается на 0,82 мм/год. При экстремальном увеличении водности (более 2300 м³/с), а вероятность та-

ких событий составляет 1 раз в 9 лет, увеличение толщины донных отложений происходит по экспоненциальному закону и может достигать 200 % от среднееголетних значений.

Исследование буровой колонки Сакского озера, проведенное В. Б. Шостаковичем [6], и последующий анализ изменения толщины микрозон ежегодно отлагавшегося ила за 4188 лет [3] позволили реконструировать разнопериодическую изменчивость условий увлажнения степной зоны. По мощности донных отложений Сакского озера, которые сформировались за последние 2500 лет, сделан вывод о том, что скорость хомогенного накопления осадков снизилась по сравнению с предыдущим периодом, что свидетельствует об относительном уменьшении аридности климата [9]. А комплексный анализ имеющихся природных архивов Крыма [13—15 и др.] позволяет представить детальную картину палеогеографических условий субатлантического периода голоцена и лучше понять пульсацию социально-экономической жизни на протяжении раннего железного века.

Заключение. Выполненный ранее [16] по 200-летним блокам спектральный анализ колонки донных отложений Сакского озера, охватывающий период более 4000 лет, указывает на присутствие двух пиков с периодами $18,5 \pm 1,5$ лет (в 18 из 21 серии) и $10,7 \pm 0,8$ лет (в 15 сериях). Эти пики были определены как

климатические сигналы, связанные с 18,6-летним лунно-солнечным и 10—11-летним солнечным циклами.

По данным метеостанций вблизи Сакского озера, при периоде в 9,3 года лучше всего проявляется зависимость циклических составляющих погодичных изменений атмосферных осадков. За 100 последних лет частота превышений норм атмосферных осадков составляла 52—59 %. В случае экстремального увеличения водности Днепра (при вероятности 1 раз в 9 лет) увеличение толщины донных отложений в озере происходит по экспоненциальному закону и может достигать 200 % от средне-многолетних значений. Наиболее устойчивыми во времени периодами седиментогенеза, кото-

рые имеют климатическую обусловленность, являются периоды 10—11 лет и связанный удвоением — 22 года. Поэтому при использовании природных архивов для реконструкции короткопериодических изменений климата целесообразно вместо годичных значений оперировать устойчивыми временными единицами хроноорганизации природных процессов.

Работа выполнена в рамках Государственного заказа № 5.397.2011 и исследовательского проекта «Economic models and adaptation strategies in a varying cultural and environmental context» (The Danish Council for Independent Research; project no. 09-069235).

Библиографический список

1. Лисецкий Ф. Н., Митряйкина А. М. Анализ дендрохронологических и климатических данных для выявления периодичности природных процессов в зоне лесостепи // В мире научных открытий. Серия «Проблемы науки и образования». — 2012. — № 2.3 (26). — С. 115—136.
2. Luterbacher J., Dietrich D., Hoxhaki E., Grosjean M., Wanner H. European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500 // Science. — 2004. — 303 (5663). — P. 1499—1503.
3. Костин С. И. Колебания климата на Русской равнине в историческую эпоху // Вопросы общей и синоптической климатологии. Тр. Главной Геофизической обсерватории. — 1965. — Вып. 181. — С. 56—74.
4. Ivanov I. V., Lisetskiy F. N. Correlation of soil formation rhythms with periodicity of solar activity over the last 5000 years // Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth science sections. — 1996. — V. 340. — No. 1. — P. 189—194.
5. Кузьменко Я. В., Лисецкий Ф. Н., Пичура В. И. Оценка и прогнозирование стока малых рек в условиях антропогенных воздействий и изменений климата // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 6; URL: www.science-education.ru/106-7640.
6. Шостакович В. Б. Иловые отложения Сакского озера как летописи климата. Саки-Курорт. 1. — Симферополь. 1935. — С. 255—272.
7. Федоров В. Н. Структура многолетних колебаний стока р. Днепр по материалам донных отложений Сакского озера // Экстремальные гидрологические ситуации. — М.: ООО «Медиа-ПРЕСС», 2010. — С. 125—136.
8. Столба В. Ф., Субетто Д. А., Сапелко Т. В., Кузнецов Д. Д., Лудикова А. В. Палеолимнологические исследования соляных озер Западного Крыма // Археологические открытия 2005 года / Ин-т археологии РАН. — М.: Наука, 2007. — С. 560—562.
9. Субетто Д. А., Сапелко Т. В., Столба В. Ф. Исследования палеолимнологов в Крыму // Природа. — 2007. — № 12. — С. 61—62.
10. Коржов Е. И. Некоторые экологически значимые аспекты водного режима Нижнего Днепра // Наукові читання присвячені Дню науки. Вып. 3: — Херсон: ПП Вишемирський В. С., 2010. — С. 4—9.
11. Швец Г. И. Многовековая изменчивость стока Днепра. — М.: Гидрометеиздат, 1979. — 84 с.
12. Кисленко А. С. Оценка вклада экстремальных ливней в темпы эрозии почв на обрабатываемых склонах Курской области // Общие, экологические и инженерные аспекты изучения гидрологических, русловых и эрозионных процессов. — М. 2008. — С. 99—109.
13. Lisetskii F. N., Ergina E. I. Soil development on the Crimean Peninsula in the Late Holocene // Eurasian Soil Science. — 2010. — V. 43. — No. 6. — P. 601—613.
14. Lisetskii F. N., Stolba V. F., Ergina E. I., Rodionova M. E., Terekhin E. A. Post-agrogenic evolution of soils in ancient Greek land use areas in the Herakleian Peninsula, southwestern Crimea // The Holocene. — 2013. — V. 23. — No. 4. — P. 504—514.
15. Герасименко Н. П. Ландшафтно-кліматичні зміни на території України за останні 2,5 тис. років // Історична географія: початок ХХІ століття. — Вінниця, Теза, 2007. — С. 41—53.
16. Currie R. G. Luni-solar and solar cycle signals in lake Saki varves and further experiments // International Journal of Climatology. — 1995. — V. 15 (8). — P. 893—917.

Periodicity of climatic, hydrological and lacustrine sedimentation processes in the south of the East-European plain

F. N. Lisetskii, Belgorod State National Research University, Russia, liset@bsu.edu.ru,

V. F. Stolba, Department of Culture and Society, Aarhus University, Denmark, klavs@hum.au.dk,

V. I. Pichura, Kherson State Agricultural University, Ukraine, pichura@yandex.ru

References

1. Lisetskii F. N., Mitryaikina A. M. Dendrochronological and climatic data analysis for identifying the frequency of natural processes in the forest-steppe zone. In the word of scientific discoveries. Series «Problems of science and education». — 2012. — No. 2.3 (26). — P. 115—136.
2. Luterbacher J., Dietrich D., Xoplaki E., Grosjean M., Wanner H. European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*. — 2004. — 303 (5663). — P. 1499—1503.
3. Kostin S. I. Climate variability on the Russian Plain in historical times. *Questions of general and synoptic climatology. Proceedings of the Main Geophysical Observatory*. — 1965. — Issue 181. — P. 56—74.
4. Ivanov I. V., Lisetskii F. N. Correlation of soil formation rhythms with periodicity of solar activity over the last 5000 years. *Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth science sections*. — 1996. — V. 340 (1). — P. 189—194.
5. Kuz'menko Ja. V., Lisetskii F. N., Pichura V. I. Evaluation and prediction of the small rivers discharge under the conditions of human impact and climate change. *Modern problems of science and education*. — 2012. — No. 6; URL: www.science-education.ru/106-7640.
6. Shostakovich V. B. Saki Lake silt deposits as annals of climate. *Saki-Kurort*. 1. — Simferopol. 1935. — P. 255—272.
7. Fedorov V. N. The structure of long-term fluctuations in the Dnieper discharge based on the Lake Saki bottom sediments. *Extreme hydrological situations*. — Moscow: «Media-PRESS», 2010. — P. 125—136.
8. Stolba V. F., Subetto D. A., Sapelko T. V., Kuznecov D. D., Ludikova A. V. Paleolimnological investigations of the West-Crimean saline lakes. *Arkheologicheskie otkrytiya 2005 goda / Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences*. — Moscow: Nauka, 2007. — P. 560—562.
9. Subetto D. A., Sapelko T. V., Stolba V. F., Investigations of paleolimnologists in the Crimea. *Priroda*. — 2007. — No. 12. — P. 61—62.
10. Korzhov E. I. Some ecologically important aspects of the Lower Dnieper water regime. *Scientific readings on the Day of Science*. V. 3. — Kherson: Vyshemirskii V. S., 2010. — P. 4—9.
11. Shvets G. I. The multi-centennial Dnieper discharge variability. — Moscow: Gidrometeoizdat, 1979. — 84 p.
12. Kislenko A. S. Evaluation of the extreme rainfall contribution to the soil erosion rates on cultivated slopes of the Kursk Region. *General, environmental and engineering aspects of the study of the hydrological, fluvial and erosion processes*. — Moscow, 2008. — P. 99—109.
13. Lisetskii F. N., Ergina E. I. Soil development on the Crimean Peninsula in the Late Holocene. *Eurasian Soil Science*. — 2010. — V. 43 (6). — P. 601—613.
14. Lisetskii F. N., Stolba V. F., Ergina E. I., Rodionova M. E., Terekhin E. A. Post-agrogenic evolution of soils in ancient Greek land use areas in the Herakleian Peninsula, southwestern Crimea. *The Holocene*. — 2013. — V. 23 (4). — P. 504—514.
15. Gerasimenko N. P. Landscape and climate changes on the territory of Ukraine over the last 2,5 millennia. *Historical Geography: the beginning of the 21st century*. — Vinnitsa, Teza, 2007. — P. 41—53.
16. Currie R. G. Luni-solar and solar cycle signals in lake Saki varves and further experiments. *International Journal of Climatology*. — 1995. — V. 15 (8). — P. 893—917.