

вы получения высоких урожаев. – Минск: Урожай, 1978. – 272 с. 7. Лыков А.М. Гумус и плодородие почвы. – М.: Московский рабочий, 1985. – 192 с. 8. Минеев В.Г. и др. Исследования баланса гумуса в дерново-подзолистых почвах на основе математического моделирования // Доклады ВАСХНИЛ. – 1986. – № 2. – С. 7-10. 9. Попов П.Д., Хохлов В.И., Егоров А.А. и др. Органические удобрения: Справочник. – М.: Агропромиздат, 1988. – 207 с. 10. Романенков В.А., Шевцова Л.К., Сиротенко О.Д. Методика использования информации длительных полевых опытов для решения мониторинговых задач и выдачи обоснованных прогнозов динамики запасов углерода в агроэкосистемах ЕТР // Влияние длительного применения удобрений на органическое вещество

почв. – М.: ВНИИА, 2010. – 352 с. 11. Динамика баланса гумуса на пахотных землях Российской Федерации. М.: РосНИИзем-проект, 1998. – 60 с. 12. Окорков В.В. Удобрения и плодородие серых лесных почв Владимирского ополья. – Владимир: ВООО ВОИ, 2006. – 356 с. 13. Минеев В.Г. Химизация земледелия и природная среда. – М.: Агропромиздат, 1990. – 287 с. 14. Окорков В.В. Антропогенная трансформация серых лесных почв Владимирского ополья при длительном применении удобрений. – Владимир: ВООО ВОИ, 2012. – 104 с. 15. Лукин С.М. Агроэкологическое обоснование систем применения удобрений в севообороте на дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах: автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. – М., 2009. – 49 с.

Поступила в редакцию 16.12.14

УДК 631.481

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ НАПРАВЛЕННОСТИ ПОЧВООБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОРОСИТЕЛЬНЫХ МЕЛИОРАЦИЯХ ЗЕМЕЛЬ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ УКРАИНЫ

Ф.Н.Лисецкий¹, доктор географических наук, В.И.Пичура², кандидат сельскохозяйственных наук

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Белгород

E-mail: liset@bsu.edu.ru

²Херсонский государственный аграрный университет, Украина, 73006, Херсон

E-mail: pichura@yandex.ru

С использованием вейвлет-анализа выполнено моделирование изменения энергетических затрат на почвообразование за период развития оросительных мелиораций в степной зоне. Для районов орошаемого земледелия предложен способ оценки естественно-антропогенного почвообразовательного процесса с учетом вклада оросительных вод в изменение гидротермического режима за период вегетации и прогнозирования направленности почвообразования под влиянием меняющихся климатических условий.

ASSESSMENT AND FORECAST OF SOIL FORMATION UNDER IRRIGATION IN THE STEPPE ZONE OF UKRAINE

Lisetskii F.N., Pichura V.I.

Simulation of changes in energy costs on soil formation in the period of irrigation reclamation in the steppe zone performed using Wavelets analysis. A method for evaluating natural-anthropogenic soil-forming process, taking into account the contribution of irrigation water to the change in the hydrothermal regime during the growing season and predict the direction of soil under the influence of changing climatic conditions for the area of irrigated agriculture was proposed.

Ключевые слова: оросительные мелиорации, степная зона, почвообразование, прогнозирование

Key words: irrigation, steppe zone, soil formation, forecasting

Степные и сухостепные ландшафты сформировались в условиях достаточного количества тепла, но недостатка влаги. По обобщенным данным метеорологических рядов (1900–2014 гг.), годовая норма суммы атмосферных осадков оценена в 400 мм, температуры воздуха – в 9,8 °С. От начала вегетации зерновых культур до их уборки в причерноморской полосе (с темно-каштановыми почвами) вероятность засухи составляет 40 %, в черноземных подзонах степи – 30 %; вероятность лет с интенсивными и очень интенсивными суховеями – 40–90 %. Почвенный покров агроландшафтов разнообразен: черноземы обыкновенные и южные, темно-каштановые почвы в комплексе с почвами солонцового ряда. Запасы питательных веществ и их доступность растениям, а также резервы продуктивной влаги обусловлены природ-

но-климатическими условиями агроландшафтов (особенностями рельефа, гидрогеологии, почвенно-климатических ресурсов и т.д.) [1]. Высокая распаханность степных и сухостепных ландшафтов (65–75 %), широкое развитие орошения, характер ветрового режима и выпадения осадков во многом определяют активное развитие дефляции и водной эрозии почв, что приводит к ухудшению их агрофизического и агрохимического состояния, а в зоне орошения сложился комплекс гидромелиоративных проблем и наметились новые тренды почвообразовательных процессов.

Актуальность разработки новых подходов к комплексным оценкам почвообразовательного потенциала климата, имеющим прогностический потенциал, обусловлена необходимостью учета антропогенного вклада при оросительных мелиорациях земель в степ-

ной и сухостепной зонах [2]. Феномен естественно-антропогенного почвообразовательного процесса на орошаемых землях заключается в его ускоренных и необратимых проявлениях, тогда как результаты агрогенно обусловленной эволюции почв в староосвоенных регионах богарного земледелия диагностируются по прошествии сотен лет [3].

Целью настоящей работы были оценка динамики и прогнозирование направленности почвообразования на примере Херсонской области, где сельскохозяйственные угодья занимают 1971 тыс. га (69,2 %), включая 1778 тыс. га пашни (90,2 %). В области сосредоточено 20 % орошаемых земель Украины, что составляет около 426,8 тыс. га, но фактически используют 285 тыс. га.

Методика. В работе использовали методологию биоэнергетического подхода [4], позволяющего моделировать сценарии климатических воздействий (через тепло- и влагообеспеченность), выраженные в энергетических эквивалентах, на тренды развития почв во времени. Ранее в развитие этого подхода усовершенствована методика расчета энергетических затрат на почвообразование (Q) в зависимости от климатических факторов [5] и предложена [6] модель зависимости мощности гумусового горизонта от Q и содержания гранулометрической фракции физической глины в почвообразующих породах. Расчет величин радиационного баланса, энергетических затрат на почвообразование (Q , МДж/м²), предельной мощности гумусового горизонта почв (H_{lim} , мм) в зависимости от Q и содержания физической глины в почвообразующих породах (PC , %; < 0,01 мм) проводили по методикам, предложенным в работах [5, 6]. Использовали данные о температуре воздуха (T , °C) и сумме осадков (P , мм) за вегетационный период восьми метеостанций Херсонской области. Оценочный период определен длительностью орошаемого земледелия (1966–2014 гг.). Привлечены данные Херсонского областного управления водных ресурсов, что позволило выявить пространственно-временные особенности распределения ирригационной влаги (IN , мм) на орошаемых землях. Для построения цифровой модели рельефа и оценки распределения по территории радиационного баланса (R , МДж/м²) использовали радарную топографическую съемку. При разложении исходного ряда Q для определения тренда (T), низкочастотных (аппроксимирующих, A), высокочастотных (D) сигналов применяли вейвлет-преобразование функции Мейера пятого порядка [7, 8], что обеспечило сохранение исходной энергии сигнала на 96,17 %. Для моделирования и прогнозирования направленности почвообразовательного процесса на орошаемых землях использовали теоретическую модель, включающую сумму синусов, вида:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (a_i \cdot \sin(b_i \cdot t + c_i)), \quad (1)$$

где x – величина изучаемого процесса; a – амплитуда колебаний; b – частота амплитуд; c – фаза (свободный член), которая постоянна для каждой синусоидальной волны в перспективе; t – дискретное значение времени в момент i ; n – число членов ряда или ретроспективная временная проекция.

Адекватность модели (1) оценивали по критериям оценки достоверности прогнозирования [9, 10]. Для пространственно-временного анализа, моделирования и прогнозирования использовали программные продукты *STATISTICA Advanced + QC for Windows v.10 Ru*, *MathWorks MATLAB 7.9 R2009b* и *ArcGIS 10.1*.

Результаты и обсуждение. К основным климатическим показателям, которые определяют энергетические затраты на почвообразование (Q), относятся сумма температур воздуха $> 10^\circ$ и сумма осадков за вегетационный период (IV–X). За 48 лет наблюдений в изменении температур за вегетацию отмечен положительный тренд, экстремум которого приходится на начало XXI в. (с периодичностью 8–9 лет). Период наблюдений (1966–2014 гг.) можно разделить на периоды формирования температуры воздуха (T , °C) в стабильном (1966–1996 гг.): $\bar{T} = 16,54 \pm 0,16$; $V = 5,4$ %; $T = -0,168 \ln(t) + 16,96$; $r = 0,16$ и нестабильном режиме (1997–2014 гг.): $\bar{T} = 18,12 \pm 0,31$; $V = 7,4$ %; $T = 16,403e^{0,0102t}$; $r = 0,76$). Рост температуры воздуха и радиационного баланса предполагает увеличение поливных норм (IN), но повышение осадков по тренд-циклическому (11 лет) сценарию обуславливает формирование положительного тренда в изменении энергетических затрат (Q_P) на почвообразование, что за последние 25 лет в условиях сложной социально-экономической ситуации (значительный рост платы за оросительную воду) привело к сокращению энергии за счет оросительной мелиорации (Q_{IN}) в 2,7 раза (рис. 1): со 147,6 (1966–1990 гг.) до 55,4 МДж/м² (1991–2014 гг.).

Зависимость динамики оросительной нормы от суммы осадков вегетационного периода имеет степенной вид. В отдельные периоды эта зависимость различалась: в 1966–1989 гг. – $IN = 20224 \cdot P^{-0,9248}$; $r = 0,795$; $r^2 = 0,632$; в 1990–2014 гг. – $IN = 20379 \cdot P^{-0,9888}$; $r = 0,801$; $r^2 = 0,652$. В 1966–2014 гг. за вегетацию сумма осадков на территории Херсонской области увеличилась с юга на север от 155 до 330 мм. При этом суммарная водоподача ($P+IN$, мм) на орошаемых землях составила 345–410 мм (рис. 2, а), что обеспечило повышение энергетических затрат на почвообразование (Q_{P+IN}) в среднем за вегетационный период на 335 МДж/м² (до 850 МДж/м²). Суммарная величина затрат энергии на почвообразование за вегетацию на территории области дифференцирована: на орошаемых землях – 790–910 МДж/м², богарных – 265–765 МДж/м².

Ранее в работе [6] была установлена зависимость предельной мощности гумусового горизонта почв (H_{lim} , мм) от энергетических затрат на почвообразова-

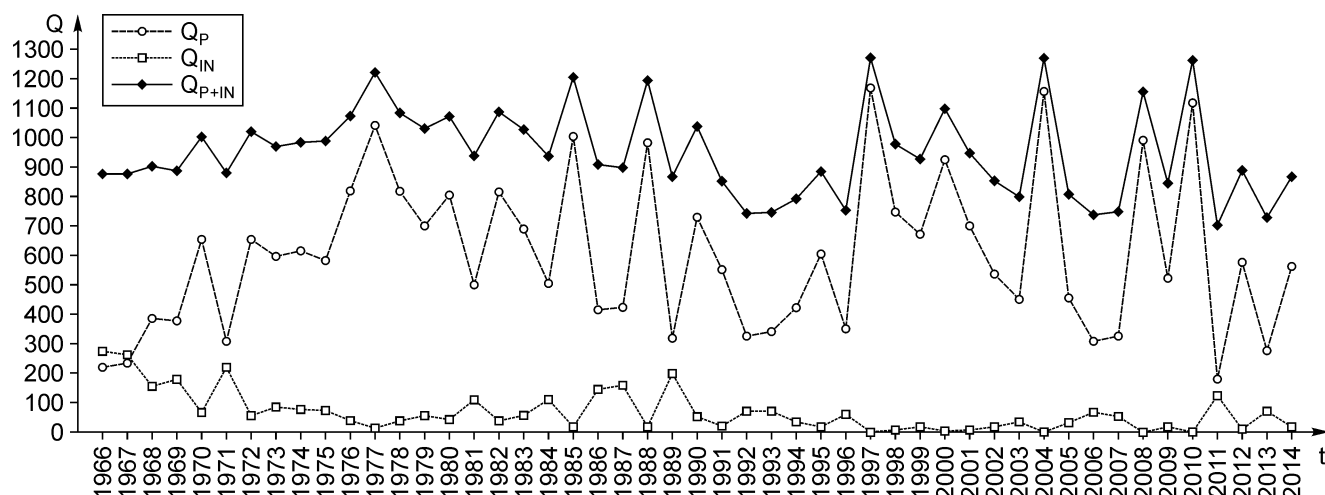


Рис. 1. Динамика климатической и антропогенной обеспеченности энергией почвообразовательного процесса при оросительных мелиорациях в степной зоне Украины (1966-2014 гг.): климатическая (Q_p , МДж/м²), антропогенная (Q_{IN} , МДж/м²), суммарная энергия (Q_{p+IN} , МДж/м²).

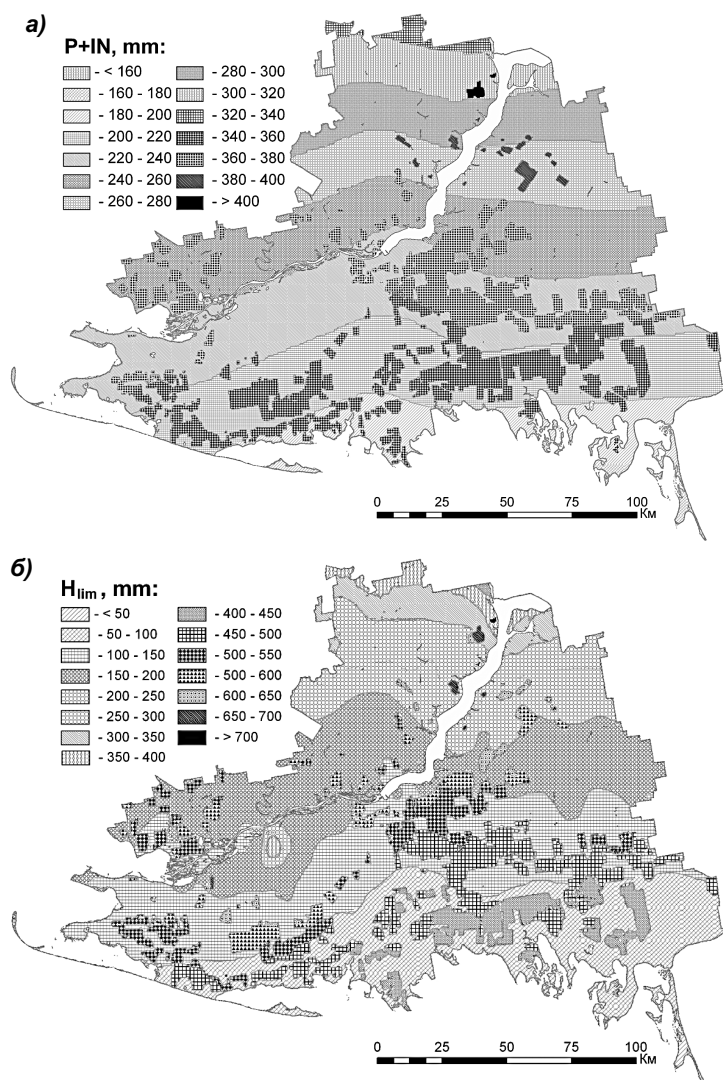


Рис. 2. Распределение условий влагообеспеченности за вегетационный период и потенциала почвообразования на орошаемых и неорошаемых землях Херсонской области: а – суммарная водоподача (сумма осадков (P , мм) и оросительных норм (IN , мм)); б – расчетная величина предельной мощности гумусового горизонта почв (H_{lim} , мм).

ние (Q) и доли гранулометрической фракции физической глины ($< 0,01$ мм; PC , %) в виде:

$$H_{lim} = \frac{3914.6 \cdot PC^{-0.19}}{1 + e^{(5.346 - 0.00523 \cdot Q)}} \quad (2)$$

Возможность учета изменений гидротермических условий в формуле (2) позволяет получить потенциальную оценку предельной мощности гумусового горизонта почв (H_{lim}). Эта величина колеблется в широких пределах (рис. 2, б), составляя в среднем на богарных землях 238 мм (45-430 мм), орошаемых – 605 мм (410-800 мм). У северной границы распространения черноземов обыкновенных и южных малогумусных (содержание гумуса (G) = 2,60-3,85 %) величина H_{lim} может достигать на богарных землях 250-430 мм, орошаемых – 630-800 мм; в зоне южных черноземов (G = 2,00-3,30 %) – соответственно 110-250 и 480-630 мм, в зоне темно-каштановых почв (G = 1,75-3,00 %) – 100-160 и 430-550 мм. Южную часть области характеризуют каштановые и лугово-каштановые солонцеватые почвы (G = 1,00-2,6 %) с прогнозной величиной H_{lim} 410-550 мм.

Согласно моделям пространственного распределения величин Q и H_{lim} , наиболее благоприятные условия для реализации почвообразовательного процесса создаются в зоне обыкновенных и южных черноземов. Но интенсивное развитие ирригации (1970-1989 гг.) привело к вымыванию гумуса в нижние горизонты и уменьшению его содержания (G , %) в слое 0-40 см с 2,56 до 2,20 %. Период 1990-2014 гг. характеризовался стабильной гидромелиоративной нагрузкой с проявлением процесса дегумификации во времени (t): ($G = -0,0061 \cdot t + 2,2914$) при незначительной

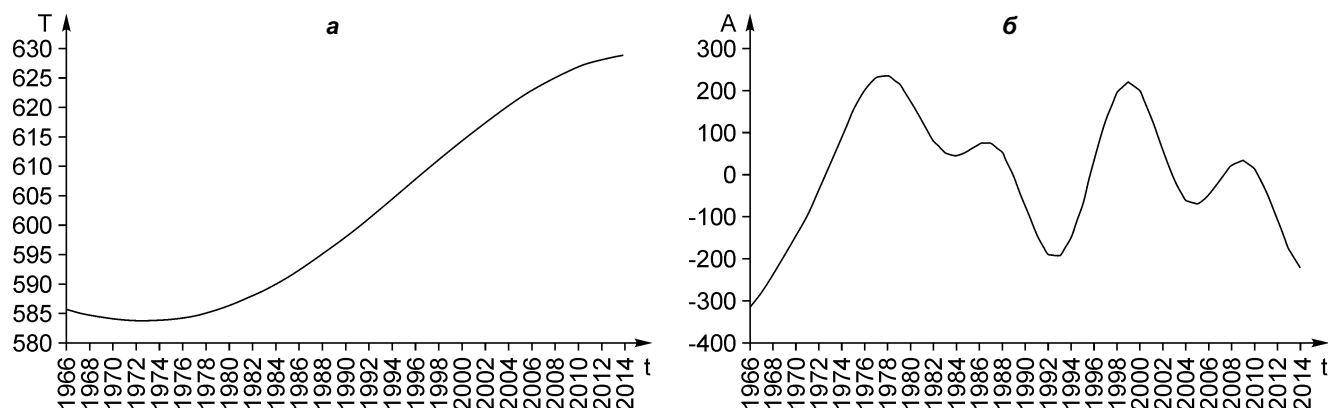
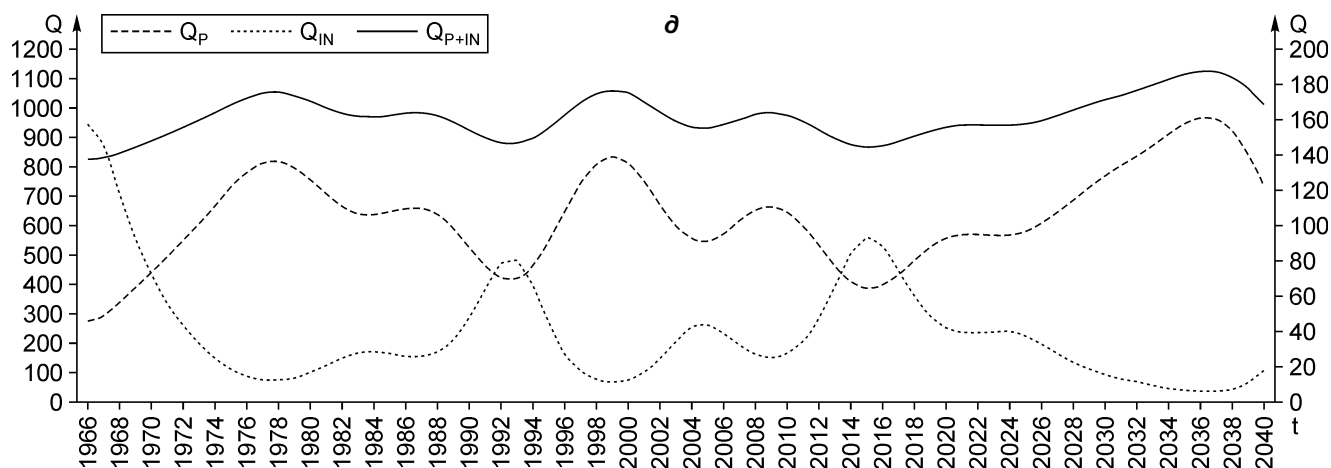
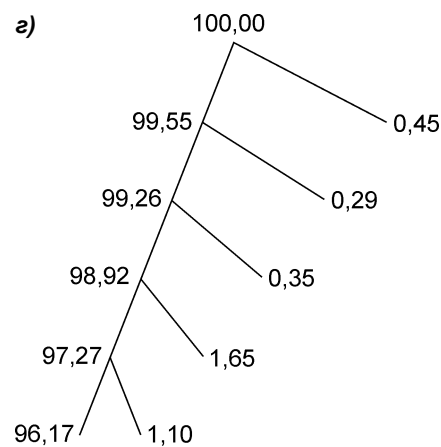


Рис. 3. Декомпозиция, динамика и прогноз изменения энергетических затрат на почвообразование для вегетационного периода до 2040 г.: а – трендовая составляющая (T); б – низкочастотная составляющая (A); в – высокочастотная составляющая (D , белый шум); г – вейвлет-дерево сохранения энергии исходного сигнала; д – динамика и прогноз энергетических затрат $f(Q) = f(T) + f(A)$ (левая ось – Q_P , Q_{P+IN} , правая – Q_{IN}).

вариации ($C_v = 0,03 \%$). В связи с этим стабилизация почвенно-деградационных процессов, в первую очередь на орошаемых землях, может быть обеспечена путем необходимого поступления в пахотный горизонт пожнивных остатков и органических удобрений, уменьшения доли пропашных культур, увеличения доли многолетних трав и полевых севооборотов, сокращения одностороннего применения минеральных удобрений (особенно физиологически кислых форм), полного использования растительных остатков на удобрение, снижения водной эрозии, включая научно обоснованную оптимизацию ирригационных норм и др.

Для прогноза направленности почвообразования при оросительных мелиорациях проведено преобразование исходного ряда климатических затрат энергии (Q_P) с помощью вейвлет-анализа. В результате декомпозиции гармонических колебаний различных уровней локализации получены трендовая (T_P , рис. 3, а), низкочастотная (A_P , рис. 3, б) и высокочастотная (D_P , рис. 3, в) составляющие. Функция пятиуровневого разложения временного ряда имеет вид суммы функций отдельных компонент: $f(Q_P) = f(T_P) + f(A_P) + f(D_P)$. На рис. 3, г представле-



$$Q_P = \begin{cases} f(T) = 1453 \cdot \sin(0,02291 \cdot t + 81,96) + 869,1 \cdot \sin(0,03151 \cdot t + 200,1), r = 0,99, r^2 = 0,98, \\ f(A) = 674,5 \cdot \sin(0,1892 \cdot t + 143,4) + 73,31 \cdot \sin(0,5141 \cdot t + 17,21) + 644,5 \cdot \sin(0,1754 \cdot t - 89,85) + \\ + 63,26 \cdot \sin(0,6238 \cdot t + 61,68) + 60,47 \cdot \sin(0,3115 \cdot t + 158), r = 0,97, r^2 = 0,94, \\ f(D) = 1113 \cdot \sin(2,912 \cdot t - 63,02) + 1110 \cdot \sin(2,918 \cdot t + 185,8) + 94,87 \cdot \sin(2,075 \cdot t + 41,05) + \\ + 85,39 \cdot \sin(1,933 \cdot t + 60,24) + 67,27 \cdot \sin(2,662 \cdot t - 88,16) + 113,4 \cdot \sin(2,496 \cdot t - 20,4) + \\ + 67,1 \cdot \sin(0,9913 \cdot t + 114,7), r = 0,79, r^2 = 0,63. \end{cases} \quad (3)$$

но вейвлет-дерево порядка следования коэффициентов пятиуровневого разложения и пошагового сохранения сигнала исходного временного ряда. Функции отдельных компонент представлены в виде функций сумм синусов: см. формулу 3 вверху страницы.

Система функций (3) обеспечивает практическую возможность осуществлять с высокой степенью достоверности долгосрочный (на основе трендовой составляющей, $f(T)$), среднесрочный (с учетом низкочастотной составляющей, $f(T) + f(A)$) и краткосрочный (с привлечением высокочастотной составляющей, $f(T) + f(A) + f(D)$) прогнозы энергетических затрат на почвообразование, если будут сохраняться существующие тенденции климатических изменений в степной зоне.

Достоверность временного моделирования для трендовой составляющей с учетом стандартной ошибки входных данных составила 94,97 %, для низкочастотной – 84,07 %, для высокочастотной – 59,02 %. Долгосрочное прогнозирование на 26 лет (2015-2040 гг.) осуществлено с привлечением трендовой и низкочастотной составляющей ($f(Q) = f(T) + f(A)$), при этом достоверность моделирования оценено в 90 % (рис. 3, д).

Результаты прогнозирования позволяют сделать вывод о том, что при сложившихся тенденциях климатических изменений в степной зоне прогнозируется повышение затрат природной энергии на почвообразование (Q_P) до 2040 г. на 80 МДж/м², что при снижении ирригационной энергии (Q_{IN}) в среднем в 1,4 раза обеспечит стабильное увеличение суммарной

энергии естественно-антропогенного почвообразовательного процесса ($Q_P + IN$) в среднем на 38 МДж/м². Это может способствовать замедлению темпов развития почвенных деградаций, наметившихся к настоящему времени.

Литература. 1. Pichura V.I., Larchenko O.V., Domaratsky E.A., Breus D.S. Spatial assessment of the suitability of agricultural lands for growing and design of grain harvest using GIS technologies // Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: Естественные, технические и медицинские науки. – 2013. – № 3. – С. 357-362. 2. Pichura V.I., Breus D.S. The basin approach in the study of spatial distribution anthropogenic pressure with irrigation land reclamation of the dry steppe zone // Biogeosystem Technique. – 2015. – V. 3. – Is. 1. – P. 89-100. 3. Lisetskii F., Stolba V.F., Marinina O. Indicators of agricultural soil genesis under varying conditions of land use, Steppe Crimea // Geoderma. – 2015. – V. 239-240. – P. 304-316. 4. Волобуев В.Р. Введение в энергетику почвообразования. – М.: Наука, 1974. – 126 с. 5. Лисецкий Ф.Н., Чепелев О.А. Климатическая обусловленность почвообразования в Центральном Черноземье // Вестник ВГУ, серия география и геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 15-23. 6. Lisetskii F., Chepelev O. Quantitative substantiation of pedogenesis model key components // Advances in Environmental Biology. – 2014. – V. 8. – № 4. – P. 996-1000. 7. Mayer Y. Wavelets, generalized white noise and fractional: the synthesis of fractional Brownian motion // The Journal of Fourier Analysis and Applications. – 1995. – № 5 (5). – P. 465-494. 8. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с. 9. Пичура В.И. Пространственно-временное прогнозирование изменений параметров агрохимических показателей мелиорируемых почв с использованием ГИС и нейротехнологий // Агрохімія і ґрунтознавство. – 2012. – № 78. – С. 87-95. 10. Pichura V.I., Pilipenko Yu.V., Lisetskii F.N., Dovbysh O.E. Forecasting of hydrochemical regime of the Lower Dnieper section using neurotechnologies // Hydrobiological Journal. – 2015. – V. 51. – № 3. – P. 100-110.

Поступила в редакцию 07.10.15