

Таким образом, перемещение влаги в ненасыщенных почвогрунтах можно описать следующим алгоритмом: вначале вода в виде пленочной влаги перемещается в поровом пространстве по механизму подвешенной влаги, а затем, при достижении критического значения – по гравитационному механизму под действием собственной массы, когда влажность находится в пределах от ММВ до ПВ. Поскольку значения этих показателей не связаны между собой и существует понятие влажности разрыва капиллярной связи, при которой подвешенная влага теряет способность свободного перемещения, полученную аномалию поведения кривой  $n=f(w)$  при  $w=0,6w_{\text{нв}}$  можно объяснить, вероятно, разрывом капиллярной связи. Этот результат согласуется с критическим значением влажности [7], разделяющим связанную и свободную воду.

Лизиметрические измерения гравитационного стока, отражающего влагопроницаемость почвогрунтов, позволяют получить ценную информацию о режимах переноса влаги в ненасыщенных средах. Понятие критической влагоемкости применимо в практических целях при орошении сельскохозяйственных культур для определения границы между связанной и свободной водой. Учет механизмов перемещения влаги в средах

с «закатым» воздухом имеет большое значение в организации орошаемого земледелия, а также при оптимизации режимов использования водных ресурсов.

**Литература.** 1. Глобус А.М. Почвенно-гидравлическое обеспечение агроэкологических математических моделей. – Л.: Гидрометиздат, 1987. – 427 с. 2. Кулик А.К. Влияние песчаных массивов на опреснение и повышение водности рек Донского бассейна // Вестник российской сельскохозяйственной науки – 2014. – № 2. – С. 39-41. 3. Кулик А.К., Власенко М.В. Опреснение и водность р. Кумылги под влиянием песков // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. научн. тр.-Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. – № 56. – Ч. 2. – С. 14-18. 4. Кулик А.К. Водный режим и баланс влаги песчаных земель Нижнего Дона (на примере Усть-Кундрюченского песчаного массива: автореф. дисс... канд. с.-х. наук (06.03.03). – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2005. – 143 с. 5. Кулик К.Н., Кулик А.К., Кулик Н.Ф. Водный баланс почв песчаных массивов (на примере Усть-Кундрюченского массива) // Почвоведение. – 2012. – № 88. – С. 846-854. 6. Аверьянов С.Ф. Зависимость водопроницаемости почвогрунтов от содержания воздуха // Доклады АН СССР. – 1949. – 69. – № 2. – С. 142-144. 7. Лихачевич А.П. Исследование гидрофизических свойств почвогрунтов // Вести национальной академии наук.-Минск, 2013. – №4. – С. 40-45.

Поступила в редакцию 11.05.16

УДК 631.41:631.483

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА В СТЕПНЫХ ПОЧВАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ И НЕЙРОТЕХНОЛОГИЙ

**Ф.Н.Лисецкий<sup>1</sup>**, доктор географических наук, **В.И.Пичура<sup>2</sup>**, кандидат сельскохозяйственных наук, **Д.С.Бреус<sup>2</sup>**

(Представлено членом-корреспондентом РАН **Г.Н.Черкасовым**)

<sup>1</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Белгород

E-mail: liset@bsu.edu.ru

<sup>2</sup>Херсонский государственный аграрный университет, Украина, 73006, Херсон

E-mail: pichura@yandex.ua

*Представлены результаты системного использования бассейнового подхода, геоинформационных и нейротехнологий для моделирования пространственной неоднородности и прогноза изменения содержания гумуса в почвах степной и сухостепной зон (черноземах и каштановых). Определена общая закономерность такого изменения в слое 0-40 см за 42 года. Интенсивное использование гидромелиоративных мероприятий в 1970-1989 гг. привело к значительному снижению содержания гумуса в среднем на 0,36 % (с 2,56 до 2,2 %). В результате анализа по 4450 точкам наблюдений выявлены уменьшение вариабельности, восходящая полиномиальная зависимость увеличения содержания гумуса в направлении с запада на восток и логарифмическая с юга на север. В результате нейротехнологического моделирования создана искусственная нейронная сеть для пространственно-временного моделирования содержания гумуса в почвах. При использовании существующих агротехнологий прогнозируется до 2025 г. необратимый процесс постепенного его уменьшения в слое 0-40 см: на богарных землях – на 0,01 %/год, на орошаемых – на 0,03 %/год. Полученный результат определяет территориальные приоритеты региональной политики и позволяет применять дифференцированную эффективность почвозащитного блока систем земледелия.*

**USE OF GEOINFORMATION AND NEUROTECHNOLOGY  
TO ASSESSMENT AND FORECAST HUMUS CHANGE  
FOR THE STEPPE SOILS**

Lisetskii F.N., Pichura V.I., Breus D.S.

*The results of systemic basin approach, geoinformation and neurotechnology for modeling and prediction of the spatial inhomogeneity changes the content of humus in the steppe and dry steppe zones (for example, the Kherson region of Ukraine). It was found that among the three types of basins most heterogeneous in structure of the soil cover are coastal and river basins. The simulation determined the overall pattern of change of the humus content in the layer 0...40 cm in 42 years – a continuous process of dehumidification of arable soils. Intensive use of irrigation and drainage activities in the 1970-1989 resulted in a significant decrease in the content of humus in an average 0,36 % (from 2,56 % to 2,2 %). As a result, the space-graphic analysis for 4450 points of observation revealed a decrease in variability and rising polynomial dependence increase the humus content in the direction from west to east and logarithmic from south to north. Autocorrelation analysis method to determine the minimum and maximum radius of a typical formation of humus, was 2,5 and 12,5 km respectively. This indicates a significant spatial heterogeneity of distribution of humus, both within the individual basins and within the contours of different soil types. Tools of multivariate statistics for the first time established the spatial distribution function and provide humus soil in the main basin of the Kherson region (with a correlation of 0,58 and 0,98, respectively). As a result of neurotechnological modeling an artificial neural network for spatio-temporal modeling of humus content in the soil. The accuracy of the approximation of the neuromodel for research hospitals was – 83-94 %. When using the existing agrotechnology is projected to 2025 irreversible process of gradual reduction of humus content in the layer 0...40 cm rainfed – 0,01 %/year on irrigated – 0,03 %/year. This result defines the territorial priorities of regional policy, allowing the use of differential effectiveness of conservation farming systems unit.*

**Ключевые слова:** плодородие почв, гумус, моделирование, прогнозирование, многомерная статистика, ГИС-технологии, нейротехнологии

**Key words:** soil fertility, humus change, modeling, forecasting, multivariate statistics, GIS-technology, neural networks

При качественной оценке агроландшафтов пространственно-временные закономерности влияния агроклиматических условий и культуры земледелия на состояние и изменение ресурсов почвенного плодородия отражаются в основном на агрохимическом состоянии пахотных почв. Анализ динамики агрохимических параметров в пространстве и во времени можно рассматривать как одну из важнейших и объективных процедур определения эффективности систем земледелия [1]. Запасы питательных веществ и их доступность растениям, а также запасы продуктивной влаги находятся в тесной зависимости от природно-климатических условий агроландшафтов (особенностей рельефа, почвообразующих пород, климата, гидрогеологии и др.) и применяемой системы земледелия, что и определяет величину и качество урожая сельскохозяйственных культур [2-5]. Агрохимические показатели имеют высокую пространственную неоднородность распределения даже в пределах почвенных разностей как следствие природных особенностей и применяемого на практике землепользования [6].

Целью настоящей работы было исследование пространственной неоднородности распределения гумуса и его изменения в почвах Херсонской области в течение 42 лет.

**Методика.** Информационной основой моделирования послужили результаты девяти пятилетних туров обследования: со II (1970-1974 гг.) по X (2008-2012 гг.). Для оценки гумусированности пахотных почв учитывали данные по 296 стационарам Херсонского центра «Облгосплодородие» X тура. Прогнозирование из-

менения содержания гумуса на 2025 г. выполнено по данным наблюдений 1978-2014 гг. в 25 стационарах, которые расположены в пределах семи природно-сельскохозяйственных районов. Общее содержание гумуса в слое почве 0-40 см определяли по методу Тюрина.

Бассейновое районирование территории Херсонской области реализовано по цифровой модели рельефа, созданной на основе радарной съемки. Методика автоматизированного бассейнового районирования представлена ранее в работах [7, 8].

Прогнозирование изменения гумуса в пространстве и во времени осуществлено методом искусственных нейросетей с использованием архитектуры многослойного персептрона [9]. С помощью модуля Statistics Neural Networks (SNN) создана нейромодель архитектуры трехслойного персептрона с тринадцатью нейронами в скрытом слое; метод обучения: обратное распределение (100 эпох) и связанных градиентов (355 эпох), матрица искусственной нейронной сети состояла из 2275 весовых коэффициентов.

Кросс-проверка прогнозных моделей проведена по статистическим критериям оценки достоверности [10]. При пространственном моделировании неоднородности распределения гумуса применяли метод радиально-базисной функции рабочего модуля Geostatistical Analyst. Для обработки использовали лицензированный программный продукт STATISTICA Advanced + QC for Windows v.10 Ru, STATISTICA Automated Neural Networks for Windows v.10 Ru и ArcGis 10.1.

**Результаты и обсуждение.** Сельскохозяйственные земли Херсонской области занимают 69 % ее общей

площади, или 1971 тыс. га, в их структуре доминирует пашня – 1777,6 тыс. га (90,2 %). В области сосредоточено 20 % орошаемых земель Украины, что составляет около 426,8 тыс. га, но фактически используют 285 тыс. га. В регионах с развитыми оросительными мелиорациями общность гидрофункционирования бассейновой агроландшафтной пространственно-временной системы [11] обусловлена природно-антропогенными особенностями распределения тепла и влаги. Территория области находится в границах трех типов водосборных бассейнов: речные – 1241,3 тыс. га (35,8 %); замкнутого поверхностного стока – 588,3 тыс. га (20,7 %); прибрежные (Черного и Азовского морей) – 1016,5 тыс. га (35,6 %).

Известно, что гумус – один из основных ресурсов потенциального плодородия почв и интегральный индикатор эффективности агротехнологического блока систем земледелия. В почвенном покрове Херсонской области преобладают малогумусные почвы с содержанием гумуса от 0,30 до 3,85 %. Основные их типы – черноземы южные, которые занимают 43,7 % всей площади сельскохозяйственных земель, и темно-каштановые почвы (30,7 %). В пределах речного бассейна доминируют черноземы обыкновенные и южные (67,7 %), в прибрежном – темно-каштановые и каштановые солонцеватые почвы

(71 %), в бассейне замкнутого поверхностного стока около 80 % занимают южные черноземы.

Особенности почвенного покрова определяют исходное содержание гумуса, которое в результате хозяйственной деятельности претерпевает динамические изменения, связанные с интенсивностью и культурой земледелия в границах земельных участков (полей севооборотов) и землепользований. В условиях орошения в различных типах почв Херсонской области в слое 0-40 см в среднем оно на 0,1-0,5 % меньше, чем на богарных землях, вследствие интенсивности и технологических особенностей оросительных мелиораций (качества воды, поливных норм, севооборотов и др.).

Ко времени II тура обследований начался период интенсивного развития ирригации, что привело к значительному уменьшению содержания гумуса: за 1970-1989 гг. в среднем на 0,36 % (с 2,56 до 2,20 %). В прибрежном бассейне, где сосредоточено больше половины орошаемых земель – 253,2 тыс. га (59,3 %), отмечены существенное снижение гумусированности почв и высокая пространственная неоднородность этого показателя. Для 1985-2012 гг. характерна стабильная гидромелиоративная нагрузка с незначительной отрицательной направленностью изменения (трендом) содержания гумуса во времени ( $t$ ):

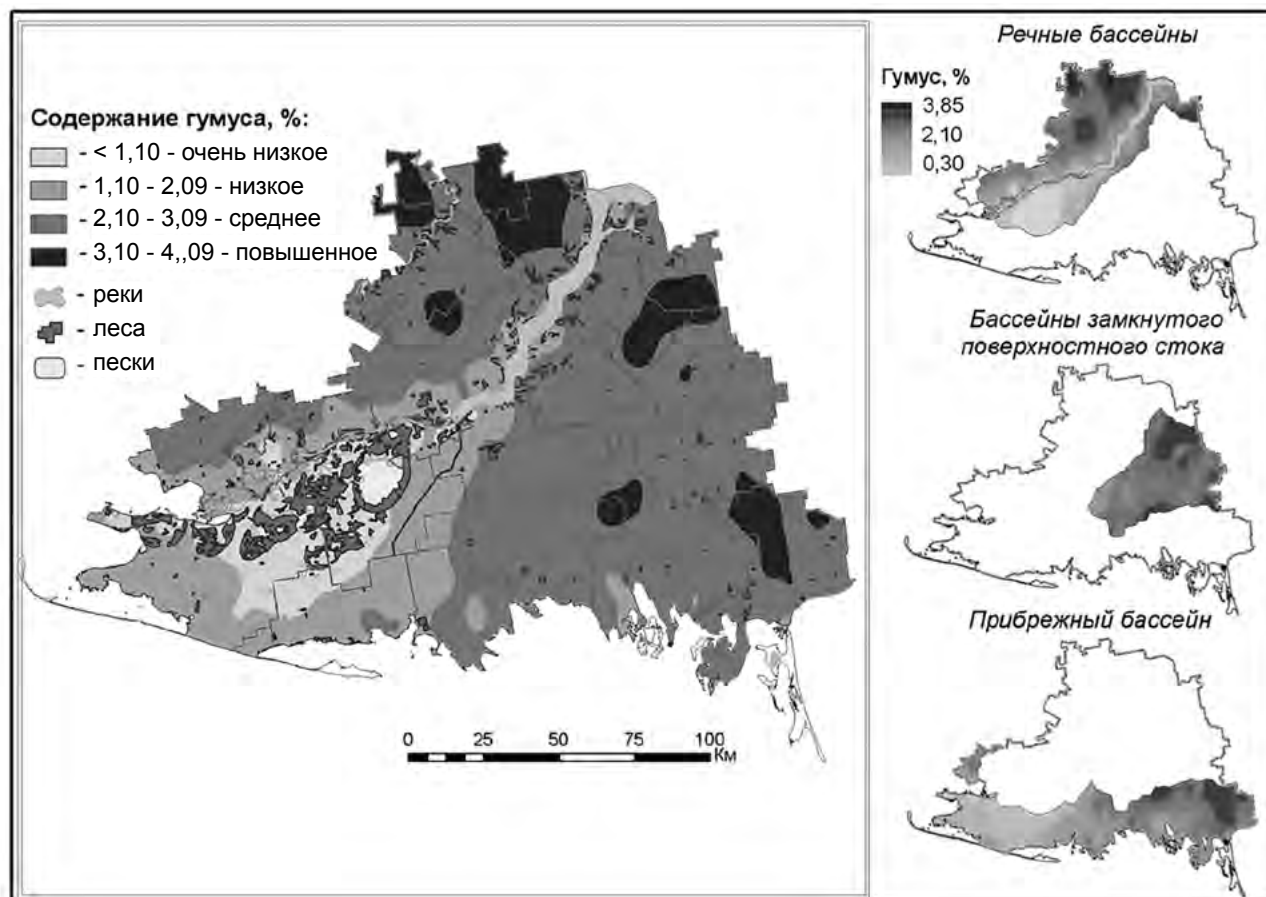


Рис. 1. Распределение содержания гумуса в почвах Херсонской области и по выделенным на ее территории типам бассейнов.

$$(T = -0,0061t + 2,2914; R^2 = 0,022).$$

С использованием данных по 296 стационарам мониторинговых исследований X тура и геостатистических методов мы создали пространственную модель ( $R^2 = 0,98$ ) распределения гумуса в почвенном покрове основных бассейнов Херсонской области (рис. 1). Графические и статистические характеристики особенностей пространственной неоднородности распределения гумуса (рис. 2) изучали на основе этой модели по результатам выборки данных в 4450 точках на территории области. Это обеспечило повышение качества интерпретации пространственной информации и результатов моделирования.

Вариабельность почвенных свойств по территории характеризуется нестационарным (нетипичным) характером их распределения в агроландшафтах при различном уровне наблюдений, что в значительной степени обусловлено почвенным разнообразием и агрохозяйственными различиями. Для такой ситуации использование автокорреляционного подхода позволяет определить максимальное расстояние распределения и сохранить возможную пространственную энергию стационарности (типичности) процесса. Это также позволяет обосновать синхронность временных изменений изучаемых показателей в радиусе лага стационарности. Автокорреляционное исследование пространственной типичности гумусированности почв проведено в направлении возрастания пространственного тренда с юго-запада Херсонской области (начало отсчета – 1-й лаг) на северо-восток. Пространственное расстояние между лагами составляло 2,5 км. В результате определена значительная корреляция на первом лаге – 0,998, но пространственная корреляция со второго лага снизилась до 0,015, что объясняется суще-

ственной нестационарностью распределения гумуса в пространстве. Чтобы снять напряжение сигнала брали разность первого лага, при этом сохраняли основной сигнал нестационарного процесса. В результате преобразования данных определены минимальный ( $r=0,391$ ) и максимальный ( $r=0,143$ ) радиус типичности формирования гумуса, который равен 2,5 (лаг 1) и 12,5 км (лаг 5). Низкая теснота связи между лагами указывает на значительную пространственную вариабельность (неоднородность) распределения гумуса как в границах отдельных бассейнов, так и внутри контуров различных типов (подтипов) почв.

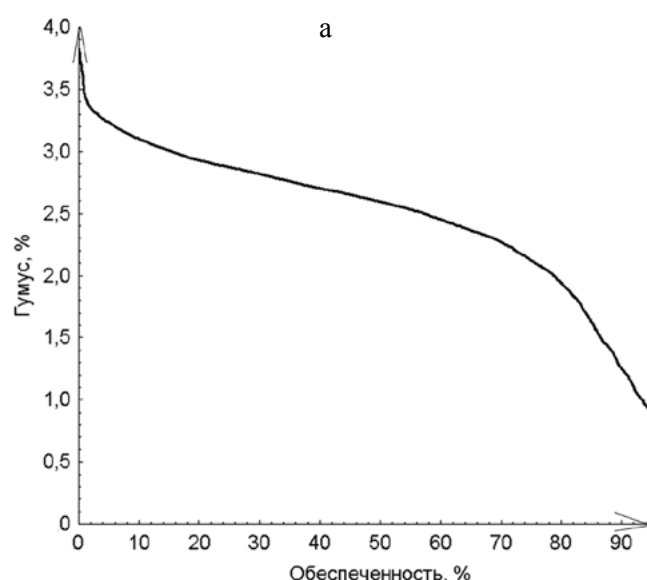
Пространственная функция распределения гумуса по основным бассейнам Херсонской области имеет вид:

$$f(h) = 25,14x - 11,98y + 0,07x^2 - 0,63xy + 0,36y^2 - 168,97; R = 0,58,$$

где  $x$  и  $y$  – долгота и широта, десятичные градусы.

Содержание гумуса в почвах (табл.), которое соответствует качественным градациям среднего и повышенного содержания ( $>2,1$  %), характеризует 72 % площади сельскохозяйственных земель. Наибольшая доля сельскохозяйственных земель со средним и повышенным содержанием гумуса приходится на бассейн замкнутого поверхностного стока – 98,6 % площади бассейна, в речном – 68,4 %, прибрежном – 60,3 %.

Максимальная однородность формирования гумуса установлена для почв бассейна замкнутого поверхностного стока, что подтверждают незначительная вариация (1,7 %) и низкая величина дисперсии (0,06). Наиболее неоднородны по степени распределения гумуса почвы речного бассейна: уровень вариации составляет 3,54 %, эксцесс – 0,47, значение асимметрии



$$f(h) = \begin{cases} \int_0^{60} -0,2447 \cdot \ln(x) + 3,61 \\ \int_{60}^{100} -0,0013 \cdot x^2 + 0,1581 \cdot x - 2, \end{cases}$$

$$r = 0,98$$

Рис. 2. Модель обеспеченности гумусом почв Херсонской области: кривая (а) и функция (б) обеспеченности.

**Распределение содержания гумуса по почвам сельскохозяйственных земель и бассейнам Херсонской области**

Содержание гумуса, %	Бассейн						Всего		
	речной		замкнутого поверхностного стока		прибрежный				
	тыс. га	%	тыс. га	%	тыс. га	%	тыс. га	%	
Очень низкое	< 1,10	69,4	9,1	–	–	55,0	7,4	124,4	6,3
Низкое	1,10 – 2,09	171,5	22,5	6,5072	1,4	240,3	32,3	418,3	21,2
Среднее	2,10 – 3,09	362,1	47,5	415,531	89,4	404,7	54,4	1182,3	60,0
Повышенное	3,10 – 4,09	159,3	20,9	42,7616	9,2	43,9	5,9	246,0	12,5
Всего		762,3	100	464,8	100	743,9	100	1971,0	100

указывает на существенную неоднородность минимальных значений. Неоднородность содержания гумуса внутри границ отдельных бассейнов в основном зависит от типа почв, степени антропогенной нагрузки и культуры землепользования.

Достоверность прогнозирования определяли на основе разделения временных рядов в соотношении 0,7 и 0,3 на два подмножества: обучающее (70 % – 26 лет) и тестовое (30 % – 11 лет). Достоверность трехслойной нейромодели на тестовой выборке по стационарным исследованиям составляла 83-94 %, что отражает высокую достоверность результатов прогноза содержания гумуса на 11 лет (до 2025 г.).

Результаты нейропрогнозирования позволяют сделать вывод о том, что до 2025 г. при использовании существующих агротехнологий практически для всей территории Херсонской области прогнозируется процесс постепенной дегумификации: на богарных землях – на 0,01 %/год, на орошаемых – на 0,03 %/год и сокращение площадей земель, характеризующихся средним и повышенным содержанием гумуса. Значительное уменьшение его содержания следует ожидать в почвах прибрежного и южной части речного бассейнов, относительно стабильная ситуация прогнозируется в северной части речного и в бассейне замкнутого поверхностного стока. Представленные подходы, методы и результаты пространственно-временного моделирования дают возможность комплексно подойти к оценке агрохимического состояния и эффективности использования сельскохозяйственных земель в разрезе генетически различных типов бассейнов с целью дальнейших разработок и внедрения научно обоснованных проектных решений повышения эффективности бассейнового природопользования в степной и сухостепной зонах.

Результаты исследования позволяют обосновать территориальные приоритеты региональной политики, дифференцировать структуру почвозащитного блока систем земледелия по его эффективности, а разработанная методика обладает достаточной степенью универсальности для ее тиражирования в других регионах.

**Литература.** 1. 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.* 2. Тюменцев Н.Ф. *Сущность бонитировки на генетико-производственной основе. – Новосибирск, 1975. – 140 с.* 3. Медведев В.В., Плиско И.В. *Бонитировка и качественная оценка пахотных земель Украины. – Харьков: Изд. «13 типография», 2006. – 386 с.* 4. *Ефективне використання ґрунтів із застосуванням сучасних геоінформаційних технологій / Балюк С.А., Пліско І.В., Трускавецький С.Р. та ін.; за наук. ред. С.А.Балюка. – Киев: Аграрна наука, 2011. – 72 с.* 5. Булыгин С.Ю., Ачасов А.Б., Лисецкий Ф.Н. *Использование интегрального анализа данных дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа при картографировании почвенного покрова черноземной зоны // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Естественные науки. – 2012. – Т. 21. – № 21 (140). – С. 143-153.* 6. *Неоднородность почв и точное земледелие. Часть 2. Результаты исследований / Под ред. В.В.Медведева. – Харьков: КП «Городская типография», 2009. – 260 с.* 7. Нарожняя А.Г., Карпенская С.Ю. *Использование геоинформационных технологий при типизации бассейновых структур // XXIV пленарное совещ. межвуз. научно-координ. совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2009. – С. 550-553.* 8. Лисецкий Ф.Н., Панин А.Г. *Бассейновая концепция природопользования на сельских территориях Белгородской области // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2013. – № 1. – С. 48-51.* 9. Хайкин С. *Нейронные сети: полный курс // Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.* 10. Павлюк Я.В., Терехин Э.А., Пичура В.И. *Использование нейротехнологий для моделирования временных процессов формирования водности рек // Эрозионные и русловые процессы и современные методы их исследования. – Белгород: ЛитКараВан, 2014. – С. 141-148.* 11. Лисецкий Ф.Н., Павлюк Я.В., Кириленко Ж.А., Пичура В.И. *Бассейновая организация природопользования для решения гидроэкологических проблем // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 8. – С. 66-76.*

Поступила в редакцию 05.09.16