



УДК 631.9: 528.4: 51-7

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СПОСОБ КЛАССИФИКАЦИИ ЗЕМЕЛЬ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МОРФОМЕТРИИ РЕЛЬЕФА****В.К. КАЛИЧКИН, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник,
А.И. ПАВЛОВА, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник***Сибирский научно-исследовательский институт земледелия и химизации сельского хозяйства СФНЦА РАН
630501, Россия, Новосибирская область, пос. Краснообск
e-mail: kvk@ngs.ru*

Предложена методология автоматизированного способа классификации плакорных земель с применением географической информационной системы (ГИС) и нейронной экспертной системы. За основу учета приняты количественные показатели рельефа. В ГИС ArcGIS 10 создана электронная карта плакорных земель, находящихся в Маслянинском районе Новосибирской области, сформирована база данных, состоящая из топографической и почвенной карт. Методом интерполирования ANUDEM создана топологически корректная цифровая модель рельефа, содержащая карты: гипсометрическую, крутизны и экспозиции склонов, плановой, профильной и общей кривизны земной поверхности, аккумулятивного стока. Установлены границы элементарных поверхностей, представляющих собой однородные морфологические образования. Учтены параметры, отражающие интенсивность протекания эрозионных процессов (индекс SPI). Суть классификации состоит в отнесении элементарных поверхностей по комплексу признаков к определенной группе земель, для чего созданы частные шкалы с характеристиками рельефа, почвенного покрова, дренированности территории, степени развития эрозии. Сформирована база знаний для обучения многослойной нейронной сети с использованием базы данных ГИС и частных шкал оценок, обучена нейронная сеть. С помощью нейронной экспертной системы проведены классификация и топология плакорных земель, распространенных на плоских и слабовыпуклых участках и характеризующихся следующими показателями: кривизна земной поверхности – плановая изменяется от 0 до 0,03, профильная – от 0 до 0,15 и общая – от 0 до 0,22; углы наклона рельефа менее 1,5°; горизонтальное расчленение рельефа менее 0,5 км/км²; вертикальное – менее 5 м; индекс SPI изменяется от –13,80 до –6,47.

Ключевые слова: ГИС, нейронная экспертная система, рельеф, сельскохозяйственные земли, классификация.

Агроэкологическая оценка и классификация сельскохозяйственных земель – необходимый этап проектирования систем земледелия [1]. Классификация, или отнесение того или иного участка земной поверхности к определенной агроэкологической группе земель, осуществляется экспертом, как правило, вручную на основании декларативной модели, созданной с применением качественных и отчасти количественных характеристик данного участка. Существует необходимость придать этому процессу формализованный характер, по возможности макси-

мально его автоматизировав. По нашему мнению, для классификации и выделения на местности так называемых плакорных земель, можно использовать морфометрические показатели рельефа.

Роль рельефа в формировании агроэкологических условий сельскохозяйственных земель общепризнана. Его изменения во времени и в пространстве оказывают влияние на агроклиматические условия, сток поверхностных вод, эрозионные процессы и др. [2, 3]. С развитием современных технологий обработки данных появилась возмож-

ность formalизовать описание рельефа, представив эту информацию в удобном для моделирования виде. Одно из возможных решений – использование количественных характеристик [4–6]. Наиболее перспективные исследования связаны с получением геоморфометрических показателей способом цифрового моделирования. В арсенале современной науки имеются также методы нечеткой логики [7] и искусственных нейронных сетей [8–10].

Цель исследования – разработать автоматизированный способ классификации плакорных земель с использованием процедур анализа и моделирования геоморфометрических показателей рельефа путем интеграции географической информационной системы (ГИС) и нейронной экспертной системы (НЭС).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований служила территория землепользования ООО «Салаир» Маслянинского района Новосибирской области. С помощью полнофункциональной ГИС ArcGIS 10 создана база данных ГИС, включающая топографическую, почвенную и землеустроительную карты. Для классификации в качестве признаков плакорных земель использовали характеристики рельефа (геоморфометрические параметры), почвенного покрова, глубины залегания грунтовых вод, степени эрозии почв. Перечисленные признаки и границы их изменения структурированы в базе данных (БД) частных шкал оценок с помощью системы управления базы данных (СУБД) Microsoft Access 2013 [11].

На основании топографической карты создана цифровая модель рельефа методом ANUDEM [12]. При моделировании размер ячейки GRID-модели был выбран равным 5 м на основе работы [13]. Это позволило вычислить количественные показатели рельефа и создать с помощью цифрового моделирования морфометрические карты крутизны склонов, горизонтального и вертикального расчленения, плановой, профильной и об-

щей кривизны земной поверхности, индекса SPI.

Морфометрические карты рельефа использованы для установления границ элементарных поверхностей, представляющих морфологически однородные образования с гранями, переходящими одна в другую посредством перегибов склонов [14, 15].

Для классификации и топологии земель использованы нейронные сети. Для обучения их с учителем создана база знаний, состоящая из совокупности элементарных поверхностей (ЭП). Отдельный контур ЭП оценивался по принадлежности к группе земель путем сопоставления атрибутивных данных ЭП и базы данных шкал оценок. Для обучения многослойной нейронной сети использован градиентный алгоритм обратного распространения ошибки с коэффициентом момента с помощью программного комплекса Matlab 2014.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор признаков классификации плакорных земель диктуется самим понятием. Под плакорными подразумеваются земли, распространенные на равнинных дренированных территориях, где развиты зональные автоморфные почвы с ограниченным перераспределением осадков и других агроклиматических ресурсов по отношению к среднесуточным характеристикам [1]. Предполагается, что земли данного типа не подвержены водной эрозии.

В связи с этим принято решение о выделении участков с различной степенью проявления водной эрозии, для чего использованы сведения о почвенном покрове территории и показатели рельефа – крутизна склонов и индекс SPI. В литературе индекс SPI называется «индексом интенсивности течений» [16], «индексом мощности линейной эрозии» [17]. Он характеризует накопление осадочных пород, потенциал развития эрозии [2, 3] и применяется для оценки эрозионных процессов [18, 19]. Исключение земель, подверженных эрозии,

позволило более объективно выделить плакорные земли на изучаемой территории.

Общий анализ гипсометрической информации землепользования ООО «Салаир» показал, что абсолютные высоты в среднем составляли 400 м, глубина базисов эрозии 20–40 м, в отдельных случаях более 50 м. Наиболее пониженные участки хозяйства относятся к речным долинам и лощинам, а также к пойме р. Елбань. Значительную часть территории (примерно 88 %) занимают склоновые земли разной крутизны. При этом пологие и очень пологие склоны в совокупности распределены на 35 % площади, крутые и очень крутые занимают 5,9 %. Среднее значение крутизны склонов составляет 3,9°.

Статистический анализ карты индексов SPI показал, что для хозяйства их значения находятся от –13,81 до 12,93; среднее значение составляет –0,48, стандартное отклонение – 2,57. Для построения карты классов SPI использован способ естественных интервалов [20]. На территории землепользования хозяйства выделены следующие классы: эрозия отсутствует (значения индексов от –13,80 до –6,47), низкий потенциал развития (от –6,46 до –1,54), средний (от –1,54 до 0,24), высокий (от 0,25 до 2,76), очень высокий (от 2,76 до 12,93).

На основании анализа электронных карт-слоев крутизны склонов, классов индекса SPI и почвенного покрова выделены

земли: слабоэрозионные с крутизной склонов от 1,5 до 3°, слабосмытыми почвами и низким потенциалом развития эрозии; среднеэрозионные – с крутизной склонов от 3 до 5°, среднесмытыми почвами, средним потенциалом развития эрозии; сильноэрозионные с крутизной от 5 до 8°, сильносмытыми почвами и высоким потенциалом развития эрозии; очень сильноэрозионные с крутизной склонов более 8°, сильносмытыми и намытыми почвами с очень высоким потенциалом развития эрозии (рис. 1).

Значение плановой кривизны изменяется от –7,9978 до 11,6838, среднее составляет –0,0029, стандартное отклонение – 0,1473. Плановая кривизна характеризует изменение градиента вдоль заданного направления и описывает первый механизм аккумуляции вещества, связанной со способностью потоков сходиться или расходиться по мере движения по земной поверхности [2, 3].

Значение профильной кривизны колеблется от –9,798 до 8,839, при среднем значении 0,003 и стандартном отклонении 0,188. Профильная кривизна служит в качестве меры относительного замедления потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием силы тяжести (второй механизм аккумуляции). Профильная кривизна влияет на ускорение или замедление потоков, т.е. на эрозию и депонирование осадков. На вогнутых участках скорость поверхностного и внутрипочвенного стоков замедляется, на

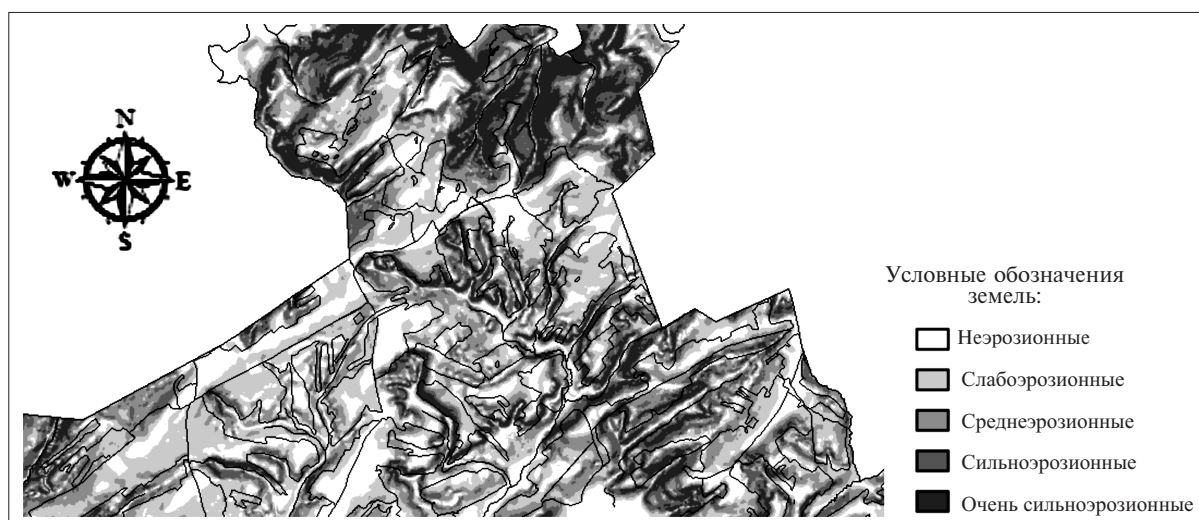


Рис. 1. Фрагмент карты эрозионных земель (М-б 1 : 50 000)

выпуклых – ускоряется. При помощи профильной кривизны устанавливается местоположение зон аккумуляции на вогнутых участках и зон его сноса – на выпуклых.

Общая кривизна изменяется от $-14,663$ до $21,482$, среднее значение составляет $-0,066$, стандартное отклонение $-0,152$. Общая кривизна служит в качестве совокупной меры кривизны земной поверхности, характеризует оба механизма аккумуляции вещества [21, 22]. Определено, что значения плановой, профильной и общей кривизны земной поверхности в пределах землепользования ООО «Салаир» изменяются в значительных пределах.

На основании полученных карт кривизны выполнено деление рельефа на выпуклые, вогнутые и плоские поверхности. Выпуклые характеризуются положительными значениями кривизны, вогнутые – отрицательными, для плоских – кривизна равна нулю (см. таблицу).

С помощью ГИС-технологий выделены элементарные поверхности по характерным точкам и структурным линиям рельефа. Характерными точками рельефа выступали наибольшие повышения и понижения, а также вершины седловин. Положение структурных линий рельефа уточнено в процессе оверлейного анализа морфометрических карт рельефа.

Элементарные поверхности охарактеризованы атрибутивными данными, включающими сведения о морфометрических параметрах рельефа, почвах, глубине залега-

ния грунтовых вод, степени эрозии. На основе информации об ЭП и базы данных частных шкал сформирована база знаний для обучения НЭС, включающая 1200 входных данных.

Для классификации и топологии плакорных земель использована многослойная нейронная сеть, обученная алгоритмом обратного распространения ошибки с коэффициентом момента (равным 0,1) в программном комплексе Matlab 2014. Обучение осуществляли с учителем при использовании сведений базы знаний. При этом число исходных образов для обучения составило 1200 шт. Согласно выбранной архитектуре для многослойного персептрона на входном слое определены нейроны с векторами признаков, два промежуточных слоя и один выходной с двумя нейронами. В качестве критериев оценки точности использованы коэффициенты MSE (Mean Square Error) и RMSE (Root Mean Square Error), которые составили 0,92 и 0,96 соответственно.

Плакорные земли выделены на возвышенных плоских и слабовыпуклых участках с углами менее $1,5^\circ$, глубиной базисов эрозии до 5 м, горизонтальным расчленением рельефа менее $0,5 \text{ км/км}^2$ (рис. 2).

Плановая кривизна для плакорных земель от 0 до 0,03, профильная – от 0 до 0,15 и общая – от 0 до 0,22. При данных геоморфологических условиях процессы эрозии проявлялись в незначительной степени или отсутствовали, индекс SPI изменялся от $-13,80$ до $-6,47$.

Фрагмент частных шкал оценок для плановой, профильной и общей кривизны земной поверхности

Показатель	Градации	Форма поверхности
Кривизна: плановая	$C_{\text{plan}} < 0$	Выпуклые в плане
	$C_{\text{plan}} > 0$	Вогнутые в плане
	$C_{\text{plan}} = 0$	Плоские поверхности
профильная	$C_{\text{prof}} > 0$	Выпуклые в профиле
	$C_{\text{prof}} < 0$	Вогнутые в профиле
	$C_{\text{prof}} = 0$	Плоские
общая	$C < 0$	Выпуклые
	$C > 0$	Вогнутые
	$C = 0$	Плоские



Рис. 2. Электронная карта плакорных земель ООО «Салаир» (М-6 1 : 50 000)

Плакорные земли распространены на темно-серых, серых и светло-серых лесных оподзоленных среднесуглинистых и маломощных почвах среднесуглинистого и тяжело-суглинистого гранулометрического состава при глубине залегания грунтовых вод более 6 м. Наиболее плодородными являются темно-серые лесные среднесуглинистые (балл бонитета 82) и серые лесные среднесуглинистые (балл бонитета 72). Плакорные земли занимают незначительную (около 12 % от общей площади землепользования) часть территории хозяйства и интенсивно используются в сельскохозяйственном производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для автоматизированного способа классификации плакорных земель возможно использование морфометрических показателей рельефа. Способ заключается в создании цифровых карт и атрибутивных баз данных к ним в среде ГИС, например, ArcGIS 10. С помощью геоинформационного моделирования на базе топографической и почвенной карт создаются дополнительные карты-слои (цифровые модели рельефа): крутизны склонов, вертикального и горизонтального рас-

членения рельефа, плановой, профильной и общей кривизны земной поверхности, индексов SPI и других производных карт, а также базы данных ГИС к ним. На основании литературных источников и статистической обработки имеющейся информации формируются частные шкалы оценок основных параметров рельефа и почв. Выделяются морфологически однородные элементарные поверхности. Создается база знаний и обучается нейронная экспертная система. Классификация и топология земель осуществляются на основе интеграции ГИС и нейронной экспертной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Агроэкологическая** оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Метод. рук-во: под ред. В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова. – М.: Росинформагротех, 2005. – 784 с.
2. **Танасиенко А.А.** Специфика эрозии почв в Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – 175 с.
3. **Рейнгард Я.Р.** Деградация почв экосистем юга Западной Сибири. – Омск, Лодзь (Польша), 2009. – 634 с.

4. **Wilson J.P.** Terrain Analysis: Principles and Applications, 2000. – 520 p.
5. **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications** / by editing Tomislav Hengl, Hannes I. – Reuter, 2009. – 765 p.
6. **Florunsky I.** Digital Terrain Analysis in soil science and geology. – Elsevier, 2012. – 379 p.
7. **Перат А.** Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. А.Г. Подвесовского и Ю.В. Тюменцева. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
8. **Барский А.Б.** Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 175 с.
9. **Рутковский Л.** Методы и технологии искусственного интеллекта / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2010. – 519 с.
10. **Редько В.Г.** Эволюция, нейронные сети, интеллект модели и концепция эволюционной кибернетики. – М.: ЛИБРОКОМ, 2011. – 220 с.
11. **Павлова А.И., Каличкин В.К.** Использование геоморфометрического анализа рельефа при создании баз данных сельскохозяйственных земель // Сиб. вестн. с.-х. науки. – 2016. – № 5. – С. 5–12.
12. **Hutchinson M.F.** A new method for gridding elevation and stream line data with automatic removal of pits. Journal of Hydrology, 1989. – 106. – P. 211–232.
13. **Hegl T.** Hiding the right pixel size // Computers and Geosciences, 2006. – Vol. 32 (9). – P. 1283–1298.
14. **Ласточкин А.Н.** Морфологическая основа систематики и картографирования контролируемых рельефом компонентов ландшафта // Изв. АН СССР. Сер. геогр. – 1991. – № 3. – С. 7–18.
15. **Ласточкин А.Н.** Системно-морфологическое основание наук о Земле (геотопология, структурная география и общая теория геосистем). – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. – 762 с.
16. **Омелько А.М., Яковлева А.Н.** Создание карт потенциальной растительности с использованием генерализованных аддитивных моделей. – Электронный ресурс: URL: <http://www.biosoil.ru/files/00010291.pdf>
17. **Глотов А.А.** Применение данных о рельефе для эффективного использования сельскохозяйственных земель // Геопрофи. – 2013. – № 4. – С. 20–22.
18. **Danielson Tyler** Utilizing a High Resolution Digital Elevation Model (DEM) to Develop a Stream Power Index (SPI) for the Gilmore Creek Watershed in Winona County, Minnesota. – Электронный ресурс: <http://www.gis.smumn.edu/GradProjects/DanielsonT.pdf>
19. **Erosion Vulnerability Assessment for Agricultural Lands (EVAAL).** Wisconsin Department of Natural Resources. 2016. – Электронный ресурс: URL: <http://dnr.wi.gov/topic/nonpoint/evaal.html>
20. **Jenks George F.** The Data Model Concept in Statistical Mapping // International Yearbook of Cartography. – 1967. – № 7. – P. 186–190.
21. **Основные геоморфометрические параметры: теория.** 2015. – Электронный ресурс: URL: <http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>
22. **Zeveloff L.W., Thorne C.R.** Quantitative Analysis of Land Surface Topography // Earth Surface Processes and Landforms. – 1987. – N 12. – P. 47–56.

COMPUTER-AIDED METHOD FOR LAND CLASSIFICATION BASED ON RELIEF MORPHOMETRY ANALYSIS

**V.K. KALICHKIN, Doctor of Science in Agriculture, Head Researcher,
A.I. PAVLOVA, Candidate of Science in Engineering, Lead Researcher**

*Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies, Russian Academy of Sciences
Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia
e-mail: kvk@ngs.ru*

There are suggested the computer-aided methods for classification of placor lands using Geographical Information Systems (GIS) and a neural expert system. Quantitative relief characteristics are adopted as a basis for recording. In the GIS ArcGIS 10 system, an electronic map of placor lands located in Maslyanino District of Novosibirsk Region was created, a database consisting of topographical and soil maps was formed. By the method of ANUDEM interpolation was developed a topologically correct digital relief model containing maps as follows: hypsometric; angle and exposure of slopes; plan, profile and total curvature of the Earth's surface;

cumulative runoff. The boundaries of elementary surfaces, being homogeneous morphological formations, were established. Parameters reflecting the intensity of erosion processes (SPI index) were taken into consideration. The main point of the classification is to attribute the elementary surfaces to a certain group of lands as to a complex of traits, for which particular scales containing characteristics of relief, soil cover, drainage of a territory, a degree of the erosion development have been created. A knowledge base was formed to train multi-layer neural network using GIS databases and particular scales; a neural network was trained. By means of the neural expert system, classification and topology of lands were conducted. Placor lands are located on flat and weakly expressive sites, and characterized by the following traits: plan curvature of the Earth's surface of 0 to 0.03, profile of 0 to 0.15, and total of 0 to 0.22; angles of relief incline less than 1.5°; horizontal dismemberment of relief less than 0.5 km/km²; vertical dismemberment of relief less 5 m; SPI index changes from – 13.80 to – 6.47.

Keywords: GIS, neural expert system, relief, agricultural lands, classification.

Поступила в редакцию 08.02.2017