

О.А. Плисенко<sup>1</sup>**АЛГОРИТМЫ И МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ЛИНИЙ ПЕРЕГИБА В СОСТАВЕ ИНФОРМАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА****АННОТАЦИЯ**

Актуальность темы исследования обуславливается отсутствием универсальной технологии автоматизированного распознавания и выделения структурных элементов рельефа. Эта задача представляет собой одно из главных аналитических направлений геоморфологического картографирования, и ее решение позволит уменьшить время на ее разработку, унифицировать результаты, расширить область применения модели гомоморфной генетически однородной элементарной поверхности в междисциплинарных исследованиях. Для решения проблемы разрабатывается информационно-математическая модель рельефа, целью которой является его представление в виде согласованного набора всех структурных элементов, моделирование полученной таким образом поверхности в 3D-пространстве, обеспечение полного автоматизированного цикла выделения и классификации структурных элементов рельефа, и представление различных алгоритмов его анализа. Описываемый этап посвящен разработке оригинальных алгоритмов и методов автоматического выделения линий перегиба склона в составе информационно-математической модели. Линии перегиба склона являются структуроформирующими при перераспределении вещественно-энергетических потоков между и в границах генетически однородных поверхностей. Автоматизация выделения линий перегиба является предпоследним этапом построения целевой модели рельефа. В работе рассматриваются основные этапы автоматизированной технологии, поставляющие исходные данные для разрабатываемых алгоритмов, дается обзор существующих методик и программных продуктов, используемых для определения линий перегибов склонов, описываются математические и алгоритмические техники, применяемые в разработанных алгоритмах, обсуждаются особенности применения данных техник применительно к разрабатываемой общей технологии. Результатом работы является оригинальная методика автоматического выделения линий перегиба склонов, позволяющая перейти к автоматическому выделению и классификации элементарных поверхностей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** информационно-математическая модель рельефа, структурные элементы рельефа, элементарная поверхность, алгоритмы выделения линий перегиба склонов, алгоритмы автоматического выделения структурных элементов

<sup>1</sup> Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центра интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, 13, 385000 Россия, г. Майкоп; Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Адыгейский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Майкоп, п. Подгорный, ул. Ленина, 48, 385064 Майкоп, Россия, e-mail: vtp01@mail.ru

Olga A. Plisenko<sup>1</sup>

## ALGORITHMS AND METHODOLOGY FOR INFLECTION LINE IDENTIFICATION WITHIN INFORMATION AND MATHEMATICAL MODEL OF RELIEF

### ABSTRACT

The relevance of this research topic lies in the fact that a universal technology for automated recognition and identification of structural relief elements is currently not available. This task is one of the main analytical directions of geomorphological mapping, and its solution will reduce the time for its development, unify the results, and expand the field of application of the homomorphic and genetically homogeneous elementary surface model in interdisciplinary research. To solve this problem, an information and mathematical relief model is developed, the purpose of which is to present surface relief in the form of a consistent set of all structural elements, simulate the obtained surface in 3D space, provide a complete automated cycle of highlighting and classifying structural relief elements, and present various algorithms for its analysis. The described work stage includes the development of original algorithms and methods for automatic identification of slope inflection lines as part of an information and mathematical model. Slope inflection lines are structuring in material-energy flow redistribution between and within genetically homogeneous surfaces. Automation of the selection of inflection lines is the penultimate stage of constructing the target terrain models. In the study, we discuss the main stages of the automated technology supplying the initial data for the developed algorithms, give an overview of the existing methods and software products used to determine the slope inflection lines, describe the mathematical and algorithmic techniques used in the developed algorithms, and discuss the peculiarities of using these techniques in relation to the developed general technology. The result of the work is an original automatic methodology for determining slope inflection lines, which allows us to proceed to automatic identification and classification of elementary surfaces.

**KEYWORDS:** information and mathematical model of relief, structural elements of relief, elementary surface, algorithms for determining slope inflection lines, automatic algorithms for identifying structural elements

### ВВЕДЕНИЕ

Задача выделения структурных элементов рельефа является одним из главных аналитических направлений геоморфологического картографирования. Под структурными элементами в большинстве исследований в этой области понимаются генетически однородные простейшие части земной поверхности, называемые «гранями», или элементарными поверхностями [Minár, Evans, 2008], а также разделяющие их структурные линии и характерные точки [Ласточкин, 2002; Minár, Evans, 2008]. Перечисленные структурные элементы используются при различных видах анализа в почвоведении, ландшафтоведении и других смежных областях, а также в прикладных областях, например, в строительстве.

Подробный обзор подходов и интерпретаций свойств элементарных частей поверхности Земли приводят в своей работе Jozef Minár и Ian Evans [Minár, Evans, 2008], выделяя два направления сегментации поверхности Земли: подход, основанный на графах, и классификационный подход.

<sup>1</sup>Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center for Intelligent Geoinformation Technologies, Gagarina str., 13. 385000 Russia, Maykop;  
Federal State Budgetary Scientific Institution “Adygea Scientific Research Institute of Agriculture”, Podgorny village, Lenina str., 48. 385064, Maykop, Russia, e-mail: vtp01@mail.ru

В рамках первого подхода, как наиболее полная, основанная на теории морфологического картографирования и системного анализа, выделяется общая теория геосистем А.Н. Ласточкина (санкт-петербургская школа), включающая четко определенную и классифицированную полную систему элементарных единиц (элементарных поверхностей и ограничивающих их структурных линий и характерных точек) в рамках общей теории геосистем.

В рамках подхода разработана методика выделения простейших элементов ЗП на первичных и вторичных моделях (картах и профилях) [Зинченко, Ласточкин, 2001].

Вторым важным направлением в сегментации поверхности Земли является классификационный подход [Brändli, 1996; Shary, 1995; Minár, Evans, 2008, Флоринский, 2021]. Концепция основана на геометрических и физических аспектах теории поля. В рамках данного подхода геометрические или элементарные формы определяются на основе их кривизны, он представляет собой пример использования многомерных статистических методов контролируемой классификации, т. е. классификации, в которой для каждого параметра определяется диапазон значений (например, кластерный анализ). Задача выделения элементарных форм сводится к определению их внутренних свойств, из которых следует определение их границ.

Элементарные формы в рамках данного подхода представляют собой отдельные единицы земной поверхности, которые могут быть классифицированы в типологические системы на основе различных критериев (геометрических, динамических, топологических и генетических). Разделение по типу (но не по знаку или значению) свойств, определяющих форму, является фундаментальным и определяет основные геометрические типы элементарных форм. [Minár, Evans, 2008; Minár et al., 2016]. Система элементарных форм является полностью открытой, т. е. добавление или изменение ее зависит только от возможности формального описания и интерпретации более сложных (более высокого порядка) типов элементарных форм через систему морфологических параметров. В рамках этого подхода рассматриваются два основных понятия: *landform* и *geomorphon*. Понятие *landform* интерпретируется как генетически однородная часть поверхности суши, включающая несколько смежных родственных элементарных форм. *Geomorphon* (геоморфологический фонотип) – элементарная единица рельефа, выраженная через структуру относительных высот вокруг анализируемой точки вне зависимости от формы структурных элементов рельефа, их ориентации и размера [Minár et al., 2016]. С помощью введенных понятий делаются попытки построить иерархические системы более крупных форм поверхности Земли.

В развитие данного подхода была разработана система морфометрических единиц для количественного описания форм рельефа П.А. Шарым [Shary, 1995]. С появлением и широким распространением геоинформационных систем (ГИС), развитием технологии воздушного лазерного сканирования, разработкой методов обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ), а также в связи с широким распространением растровой цифровой модели рельефа (Digital Elevation Model DEM), ставшей практически синонимом цифровой модели рельефа (ЦМР), сформировалась отдельная научная дисциплина – геоморфометрия, предметом которой является математическое моделирование и анализ рельефа, основанные на физико-математической теории топографической поверхности, представляющей расширение раздела дифференциальной геометрии, посвященного кривизне поверхности [Флоринский, 2021].

Математический аппарат геоморфометрии опирается на представление рельефа с помощью растровой модели высот, т. е. DEM., и не охватывает другие модели, такие как TIN, или изолинейное представление, используя их только в качестве дополнительных средств предобработки.

Основными проблемами при использовании данного подхода является зависимость выделения целевой формы поверхности и точности классификации, ее результата от разрешения и качества исходных материалов, а также отсутствие строгого математического описания структурных линий рельефа [Флоринский, 2021].

Кроме того, выделение элементарных форм поверхности Земли ставится в зависимость от цели исследования, корректного использования морфометрических параметров и автоматизированных методов их вычисления, что также может быть как плюсом, так и минусом.

В отличие от гибкого определения элементарной формы в рассмотренном подходе, общая теория геосистем, развиваемая Санкт-Петербургской школой, дает конкретное определение простейших структурных элементов (элементарная поверхность, структурные линии и характерные точки). При этом соблюдаются «пять признаков элементности» [Ласточкин и др., 2008]: неделимость, взаимосвязанность, определение через другие элементы, а не за счет внутренних свойств, точность выделения, адекватность отражения на моделях (карте, профиле, описании). Параметрическая корреляционная систематика всех элементов ЗП производится по четырем количественным критериям – основным геоморфологическим параметрам ЗП: по положению по вертикали и крутизне, нормальной и горизонтальной кривизне. С площадными элементами связываются все виды систематизированных геотопов в ландшафтной оболочке, структурные линии рассматриваются в качестве общегеографических разделительных и, вместе с тем, связывающих границ элементарных поверхностей, а характерные точки – в качестве репрезентативных точек наблюдения и мониторинга.

На наш взгляд, оба обозначенных подхода имеют особую значимость при проведении как геоморфологических исследований, так и прикладных узкопредметных. Но на данный момент не существует универсальной автоматизированной технологии выделения всех взаимосвязанных структурных элементов согласно общей теории геосистем. Целью нашей работы является разработка алгоритмического и программного обеспечения, реализующего этот подход.

Анализ методик выделения элементарных гомоморфных поверхностей рельефа показал, что на определенных этапах используются различные современные цифровые материалы, полученные путем компьютерных вычислений (с помощью ГИС и других программных продуктов). Однако универсальной технологии автоматизированного распознавания и выделения элементарных поверхностей, а также других структурных элементов, не существует, что приводит к различным результатам на одной и той же территории. Кроме того, использование существующих инструментов автоматизации также не приводит к выделению отдельных единиц, характеризующихся единичными значениями уклона, экспозиции и т. п., представляющих собой геометрически однородные участки земной поверхности. Таким образом, становится актуальна разработка информационно-математической модели рельефа, включающей вычислительные и интеллектуальные алгоритмы выделения всех структурных элементов рельефа, описания и классификации выделенных элементов, методы хранения и последующей аналитической обработки информации о выделенных элементах в системах управления пространственными базами данных.

Целью разработки модели является представление рельефа в виде согласованного набора всех структурных элементов, обеспечение их автоматизированной классификации, моделирование полученной таким образом поверхности в 3D-пространстве, а также представление различных алгоритмов анализа рельефа.

Информационно-математическая модель рельефа разрабатывается в виде интеллектуальной геоинформационной системы с интегрированной в нее экспертной системой, что позволяет использовать базу знаний и машину логического вывода для выполнения слабоформализованных этапов при выделении и классификации структурных элементов. Такая интеграция обеспечивает возможность анализа различного рода информации топографического, геоморфологического и специального характера, и получения полного согласованного набора всех структурных элементов. Возможность оперировать при анализе единицами, представляющими структурные элементы поверхности рельефа, дополняется информационной частью, полученной в ходе выделения этих структурных элементов, а именно класса каждого из структурных

элементов согласно общеизвестной классификации, значений уклонов и экспозиций каждой элементарной поверхности.

Теоретическим основанием разработки информационно-математической модели рельефа служит теория А.Н. Ласточкина [Ласточкин, 2002], а также разработанная под его руководством методика [Зинченко, Ласточкин, 2001]. Полное и обоснованное описание основных теоретических положений, универсальная классификация структурных элементов, построенная по методу полной группы, строгая методика по составлению геоморфологической карты – все это позволяет использовать указанную теорию и методологию в качестве основы разрабатываемой модели.

Исходными материалами для построения модели служат цифровые топографические карты рельефа, включающие в себя горизонтали, отметки высот, особые линии, такие как осыпи, и т. п., где каждый объект представлен в векторном виде. Выбор именно таких исходных данных обусловлен несколькими причинами:

- 1) первоначальная генерализация данных, обеспечиваемая методом построения изолинейных карт;
- 2) возможность анализа динамики изменения поверхности рельефа во времени;
- 3) возможность получения таких карт при непосредственном сканировании рельефа различными техническими средствами или геодезической съемке.

Разрабатываемая модель включает в себя два основных модуля: математический и информационный. Математический модуль объединяет алгоритмы автоматического и автоматизированного выделения всех структурных элементов – точек, характерных линий и элементарных поверхностей. Информационная часть представляет собой базу данных по каждому структурному элементу поверхности, дополненную информацией о классе данного элемента и интегрированными числовыми характеристиками (например, для элементарной поверхности это может быть уклон, экспозиция и т. п.).

Для реализации математико-алгоритмической части модели применяются интеллектуальные технологии, в частности, экспертная система, т. е. та ее часть, которая работает с базой знаний и машиной логического вывода. Экспертная система рассматривается в виде интегрированного модуля и описана нами ранее [Плисенко, 2016]. На данном этапе разработаны и реализованы алгоритмы выделения основных характерных линий и точек.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Точки перегиба или изменения градиента склона, которые повторяются в ландшафте, легко различимы и обычно соответствуют различиям во внутренней структуре (лежащей в основе геологической структуры). Таким образом, точки перегиба на склонах часто обозначают естественные границы между квазиоднородными поверхностями. Например, почвоведы используют изгибы склонов в качестве видимых признаков изменений в почвах.

В различных источниках можно встретить следующие названия этих поверхностно-образующих структурных линий: бровка, край, перегиб, изгиб, вогнутый перегиб, тыловой шов и т. п. Выявление линий перегиба склона, характеризующих форму вертикального профиля, и объединение их со структурными вдольсклоновыми линиями (морфоизографы и т. п.) позволяет выделить элементарную поверхность и классифицировать форму поверхности, ограниченной этими линиями. С точки зрения классификации по нормальной или вертикальной кривизне или по форме поперечного профиля выделяются вогнутые, выпуклые и прямолинейные поверхности.

Несмотря на разработанную методику геоморфологического картографирования [Зинченко, Ласточкин, 2001], проблема автоматизированного выделения всех типов структурных линий, в том числе и линий перегиба склона, не имеет однозначного решения. Т. е. до сих пор не разработаны автоматические или хотя бы полуавтоматические алгоритмы выделения структурных линий (СЛ). Попытки решить данную задачу можно разделить на две группы: использование средств геоинформационных систем

для упрощения выделения линий и затем ручная обработка всех данных, и разработка специализированных программных продуктов, обычно решающих одну конкретную задачу.

В качестве примера первого подхода рассмотрим следующие техники [Колбовский, 2016; Татаренко, Елишина, 2012]. Выделение структурных линий, ограничивающих элементарные поверхности, предлагается проводить поэтапно, путем построения различных типов карт на основе растровой цифровой модели рельефа, а окончательное проведение границ элементарных поверхностей и выделение СЛ – в ручном режиме на основе экспертного анализа вышеперечисленных материалов.

Например, Колбовский Е.Ю. [Колбовский, 2016] ставит целью определение местоположения геотопов, ассоциируемых с элементарными поверхностями. В качестве исходных материалов рассматривается цифровая модель рельефа в виде матрицы высот и среднemasштабные космические снимки. Алгоритм представляет собой последовательность следующих шагов в среде ГИС: районирование территории по набору и иерархии ландшафтообразующих факторов, построение растровых моделей по основным геоморфологическим параметрам, переклассификация растров для нормализации параметров, комбинирование растров и экспертное получение матрицы геотопов.

В работе Татаренко В.И. [Татаренко, Елишина, 2012] перечисляются основные методы построения геоморфологических карт, как аналитические, так и с применением ГИС, и дается обзор математических методов, реализуемых современными ГИС для выполнения отдельных этапов построения карт. В частности, рассматривается применение тренд-анализа с использованием определенных фильтров, разработанных в теории случайных процессов, для выделения в рельефе характерных линий перегиба склона.

В качестве примера второго подхода, т. е. использования специализированного программного обеспечения, предназначенного для решения узкого ряда задач, можно привести программный продукт GeoCAP норвежской фирмы “GEOCAP AS”<sup>1</sup> – это программное обеспечение для картографирования и моделирования геологических структур и данных, описывающих геологическую информацию. Применение данного программного продукта описано в работе Фирсова Ю.Г. [Фирсов, 2011] для анализа батиметрических профилей и определения положения точек подножия континентального склона на батиметрических профилях.

Для выделения перегибов склона в этом программном продукте используется несколько алгоритмов, имеющих различную чувствительность к исходным данным. Все вычисления производятся на растровой цифровой модели рельефа с использованием загруженных из файла или оцифрованных батиметрических профилей.

Программный продукт представляет две группы методов: использование различных фильтров, таких как скользящее среднее, медианный фильтр, фильтр нижних частот Фурье и т. п., и алгоритмы вычисления и изменения градиента вдоль профиля. В том числе и оригинальный, разработанный GeoCAP алгоритм, “Geocap Change of Average Gradient” («Изменение среднего градиента GeoCAP»).

Рассмотрим классический метод определения точек перегибов склона, представленный в GeoCAP, основанный на приближении первой и второй производной от высоты с помощью конечных разностей. Метод использует соседние точки каждой анализируемой точки для вычисления градиента и скорости изменения градиента. Входные данные для этого алгоритма должны иметь регулярную сетку (профиль должен быть наложен на регулярную сетку). Т. е., если входные данные не представляют собой регулярную сетку из высот, то должна быть предварительно проведена линейная передискретизация или передискретизация с помощью сплайна. Описанный алгоритм чувствителен к шуму, поскольку вычисления включают в себя всего несколько рядом расположенных точек.

<sup>1</sup> GeoCAP. Электронный ресурс: <https://geocap.atlassian.net/wiki/spaces/ug/pages/7372985/Geocap+Main>

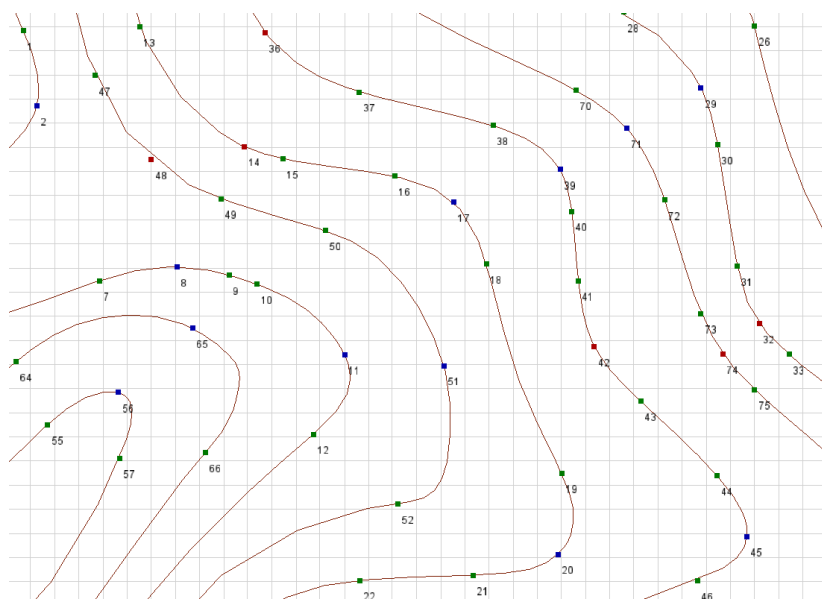
Для минимизации влияния шума на вычисления был разработан метод “Geosar Change of Average Gradient”. Чтобы вычислить изменение градиента в точке, метод использует средний градиент в заданном интервале до и после анализируемой точки и сравнивает их, чтобы определить изменение градиента в этой точке.

В перечисленных методах и подходах получаются чисто механические результаты, не связанные в единое целое с другими структурными элементами рельефа, такими как характерные точки и элементарные поверхности, что не позволяет выйти на полный автоматизированный цикл выделения и классификации структурных элементов рельефа.

В разрабатываемой информационно-математической модели рельефа выделение линий перегибов склона является последним этапом перед автоматизированным определением элементарных поверхностей и использует всю информацию, полученную на предыдущих этапах, описанных ранее [Плисенко, 2016, 2017].

Обобщенный алгоритм выделения элементарных поверхностей включает следующие стадии:

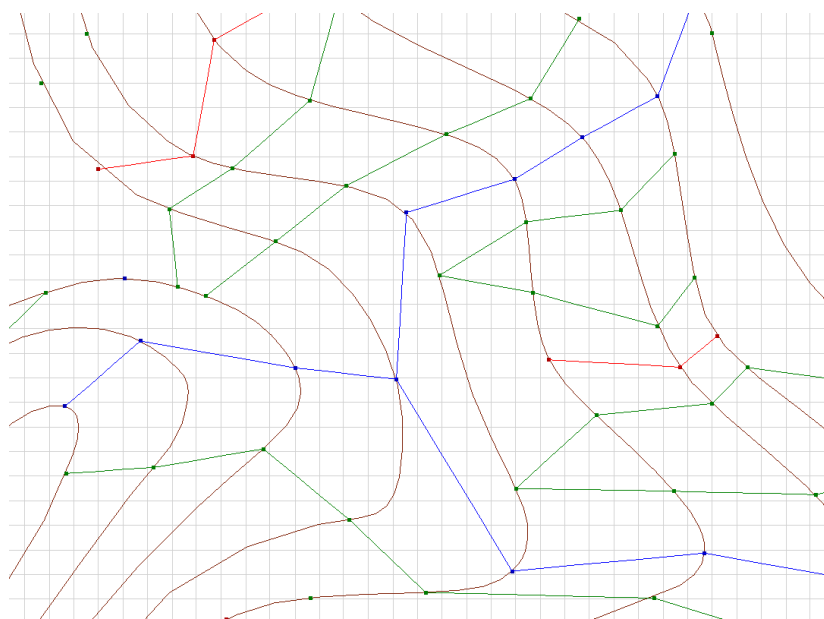
- 1) анализ горизонталей и выделение точек с максимальной и минимальной горизонтальной кривизной, а также точек перегибов горизонталей при смене характера поверхности (выпуклая на вогнутую, вогнутая на прямолинейную и т. п., будем называть такие точки особыми);
- 2) выделение структурных склоновых линий (гребневые, килевые, морфоизографы);
- 3) выделение линий перегибов склона;
- 4) выделение элементарных поверхностей. На рис. 1 приведен фрагмент электронной карты горизонталей с выделенными на них особыми точками.



*Рис. 1. Результат работы экспертной системы по выделению особых точек на горизонталях (синим выделены особые точки килевых линий, красным – особые точки гребневых линий, зеленым – морфоизографы)*  
*Fig. 1. Result of the expert system work on singling out special points on horizons (blue marks special points of keel lines, red marks special points of ridge lines, green marks morphoisographs)*

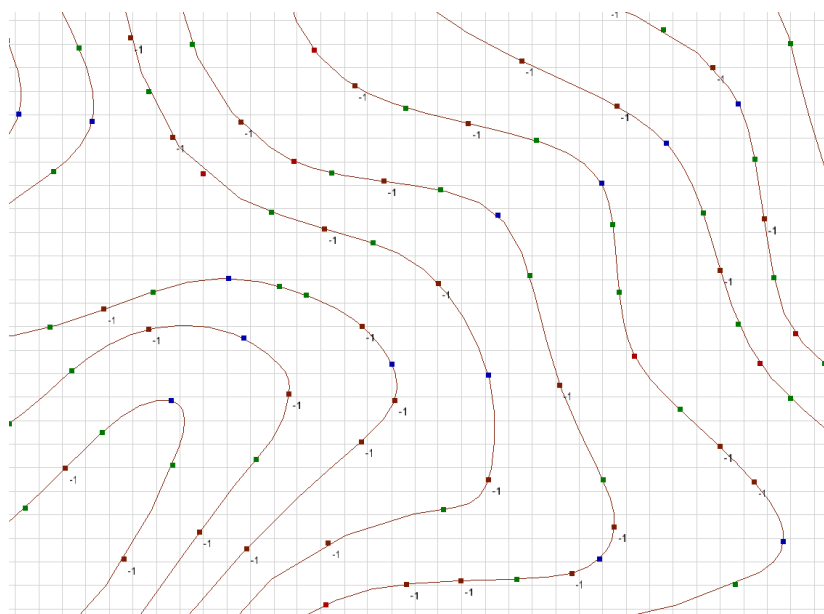
При этом каждая из точек имеет свой тип, который указывает принадлежность ее к определенному классификационному типу структурной линии. Используя данную информацию и алгоритм нахождения соседних точек с помощью диаграммы Вороного, а также машину логического вывода экспертной системы, точки объединяются в структурные линии, которые также сразу классифицируются согласно принятой за

основополагающую классификации А.Н. Ласточкина [Ласточкин, 2002]. На рис. 2 показан результат работы экспертной системы с выделенными структурными линиями.



*Рис. 2. Выделенные структурные склоновые линии (синие – килевые линии, красные – гребневые, зеленые – морфоизографы)*  
*Fig. 2. Highlighted structural slope lines (blue – keel lines, red – ridge lines, green – morphoisographs)*

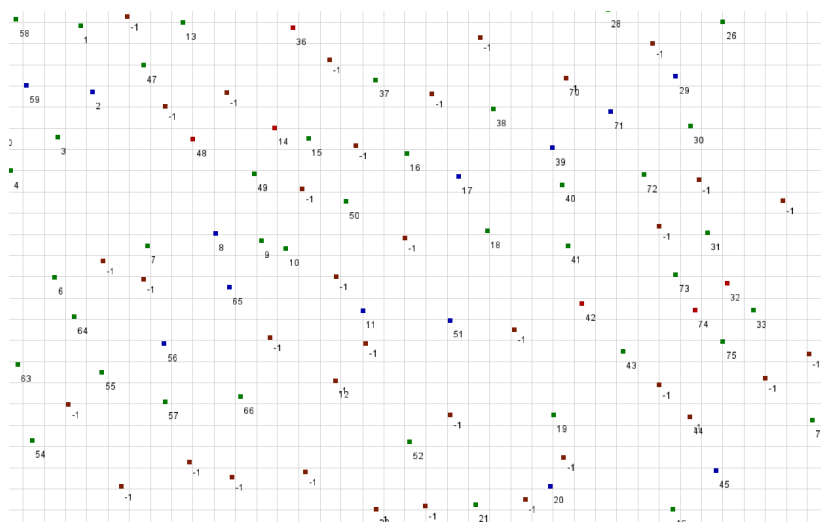
Полученные результаты второго этапа – выделенные особые точки, принадлежащие структурным склоновым линиям, дополняются вспомогательными точками, уточняющими форму поверхности. При этом учитывается длина участка горизонтали, т. е. на слишком коротких участках точки не вставляются. На рис. 3 показана система выделенных особых точек с уточняющими (уточняющие точки помечены цифрой -1).



*Рис. 3 Система выделенных особых точек с уточняющими (уточняющие точки выделены коричневым цветом)*  
*Fig. 3. System of selected special points with clarifying points (clarifying points are highlighted in brown)*



Таким образом, исходными данными для третьего этапа выделения структурных линий перегибов склонов является поле точек, имеющее сравнительно равномерное распределение на участке анализа. На рис. 4 представлен фрагмент электронной карты с полем особых точек.



*Рис. 4 Поле особых точек, представляющих исходные данные для третьего этапа – выделения линий перегибов склона*  
*Fig. 4. Field of special points representing initial data for the third stage – identification of slope inflection lines*

Алгоритм выделения линий перегиба склона также делится на два этапа. На первом этапе, используя математический аппарат неоднородных рациональных В-сплайновых (Non-uniform rational B-spline – NURBS) поверхностей для интерполяции поля точек, строится математически точная модель поверхности, описываемая относительно простым вычислительным аппаратом, далее с помощью построенной модели вычисляются особые точки, принадлежащие линиям перегибов склона. На втором этапе, используя диаграмму Вороного и экспертную систему, выделяются линии выпуклых и вогнутых перегибов склона.

NURBS поверхности представляют собой метод интерполяции произвольной поверхности гладкими полиномами невысоких степеней. В нашем случае достаточно взять степень 3, так как исходными данными является система изолиний, при построении которой используется линейная интерполяция между изолиниями разной высоты. NURBS поверхности применяются для моделирования сложных трехмерных объектов и поверхностей в 3D-пространстве, и могут учитывать резкие перегибы и изменения поверхности с помощью задания веса узла интерполяции. Использование математического аппарата NURBS поверхностей позволяет получить аналитическую формулу поверхности, зависящую от параметров, по ее экспериментальным узловым точкам. Имея уравнение поверхности, можно получить доступ к любой ее точке, вычислить первую и вторую производную в ней, вертикальную кривизну и т. п. При этом совпадение узловых точек моделируемой поверхности с характерными точками и точками структурных линий рельефа дает наиболее точный результат [Никулин, 2005, с. 345].

NURBS представляет собой параметрическую поверхность, т. е. функцию двух независимых параметров (обычно обозначаемых  $u$ ,  $v$ ) в некоторой двумерной области. Область поверхности определяется как диапазон параметров ( $u$ ,  $v$ ), которые преобразуются в трехмерную точку на этой поверхности. Область в каждом измерении ( $u$  или  $v$ ) обычно описывается как два действительных числа (от  $u_{\min}$  до  $u_{\max}$  и от  $v_{\min}$  до  $v_{\max}$ ). Т.е. NURBS поверхность можно представить в виде сетки кривых, идущих в двух направлениях. Форма поверхности NURBS определяется количеством контрольных точек и степенью этой поверхности в каждом из двух направлений ( $u$ - и  $v$ -направления).

Для получения NURBS поверхности исходная система точек параметризуется, т. е. каждой точке приписывается значения  $i$  и  $j$  из диапазона  $[u_{\min}, u_{\max}]$  и  $[v_{\min}, v_{\max}]$ . Указанные точки становятся контрольными для моделируемой поверхности. Таким образом, получаем аналитическое описание поверхности рельефа.

На следующем шаге работы алгоритма рассматривается прямоугольная область анализируемого участка и с определенным шагом проводятся линии профилей поверхности. Каждая построенная линия анализируется методом скользящего окна с целью поиска точек перегиба, которые представляют собой точки с нулевой второй производной (и, соответственно, с нулевой вертикальной кривизной). При этом сразу определяется изменение формы поверхности в профиле, т. е. переходы от выпуклого к вогнутому, от вогнутого к прямолинейному и т. д.

В результате первого этапа к системе особых точек поверхности добавляются особые точки, представляющие точки перегибов профилей.

На втором этапе по полученной системе особых точек строится диаграмма Вороного, которая позволяет определить отношения соседства для каждой из точек. Далее с помощью продукционных правил экспертной системы строятся линии выпуклых и вогнутых перегибов склонов.

В результате работы алгоритма получены структурные линии выпуклых и вогнутых перегибов склона, которые замыкают множество всех структурных линий поверхности рельефа, выделяемых согласно принятой за основу классификации А.Н. Ласточкина. Кроме того, получена система особых точек рельефа, принадлежащих множеству структурных элементов, которая позволяет выйти на этап автоматического выделения и классификации элементарных поверхностей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработка алгоритмов автоматического выделения линий перегиба склонов представляет предпоследний этап в полном цикле автоматического выделения структурных элементов. Его результаты дополняют систему исходных точек для алгоритмов выделения элементарных поверхностей.

Каждый из представленных алгоритмов позволяет настраивать дополнительные параметры в определенных пределах для улучшения качества распознавания структурных элементов в зависимости от типа рельефа. Все этапы тесно взаимосвязаны и представляют полную технологию автоматического выделения полной группы структурных элементов поверхности рельефа. Поэтому алгоритмы не ориентированы на использование уже готовых решений, представленных в широко распространенных геоинформационных системах общего назначения. Дополнение представленных алгоритмов базой данных и экспертной системой приводит к созданию специализированной геоинформационной системы для геоморфологического моделирования. Для исследования и апробации всей технологии был разработан программный продукт, представляющий собой специализированную геоинформационную систему, включающую многофункциональный интерфейс, позволяющий настраивать работу всей технологической цепочки. На данный момент программный продукт позволяет выделять все характерные точки и основные структурные линии (гребневые, линии тальвегов, вдольсклоновые гребневые и килевые, морфоизографы). С помощью разработанной программы были выделены перечисленные структурные элементы для территории с сопоставимой ландшафтной местностью, с использованием карт масштаба 1:25 000.

При разработке алгоритмов учитывались последние достижения геоинформатики и трехмерной компьютерной графики, для построения математической модели в разработанном программном продукте использовались последние версии математических библиотек, таких как OpenNURBS. OpenNURBS представляет собой библиотеку классов, реализующую математический аппарат неоднородных рациональных B-сплайновых кривых и поверхностей, построенную по принципам объектно-ориентированного подхода. Это библиотека с открытым кодом, которая используется практически во всех

современных САД системах (системах автоматизированного проектирования), например, таких как AutoCAD и ArchiCAD, и представляет инструмент для математического описания любых и, в том числе, очень сложных поверхностей.

Каждый из представленных алгоритмов отработывался на участках среднегорного рельефа, что позволило их уточнить и усовершенствовать. Полученные результаты доказывают возможность реализации и эффективного использования разработанной технологии и предоставляют возможности дальнейшего исследования в этом направлении, уточнения и оптимизации алгоритмов, разработки новых видов анализа и т. п.

В качестве дальнейших исследований предполагается разработка алгоритмов автоматического выделения и классификации элементарных поверхностей, исследование разработанной технологии на различных типах рельефа, анализ вопросов формирования, хранения и представления информационно-математической модели рельефа в цифровом виде. Отдельным направлением исследований являются способы применения разрабатываемой модели в предметно-ориентированных ГИС и технологиях прогнозирования природных опасностей [Варшанина, 2011]. На данный момент результаты работы апробируются в геоинформационной системе поддержки экологически сбалансированного адаптивно-ландшафтного и умного точного земледелия в Республике Адыгея [Варшанина и др., 2020].

## ВЫВОДЫ

Представленные алгоритмы являются важным этапом новой геоинформационной технологии автоматического выделения структурных элементов поверхности рельефа, основаны на современных методах трехмерной компьютерной графики и искусственного интеллекта. Позволяют решить до сих пор актуальную задачу автоматизации полного цикла геоморфологической структуризации рельефа, с автоматической классификацией полной группы структурных элементов, привлечь внимание к разработке широкого круга вопросов теории и программной реализации технологий геоинформатики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варшанина Т.П. Перспективы прогнозирования экологически значимых природных опасностей на основе структурно-подобной модели. Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки, 2011. № 4. – С. 128–137.
2. Варшанина Т.П., Шехов З.А., Пьянков В.Ю. ГИС экологически сбалансированного ландшафтно-адаптивного землепользования. Ландшафтоведение и ландшафтная экология: коадаптация ландшафта и хозяйственной деятельности: Материалы международной научно-практической конференции. Симферополь, 2020. С. 82–86.
3. Зинченко А.Г., Ласточкин А.Н. Методика геоморфологического картографирования шельфа и континентального склона Российской Федерации (применительно к задачам Госгеолкарты-1000). М: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. 38 с.
4. Колбовский Е.Ю. Геоинформационное моделирование и картографирование ландшафтных местоположений. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2016. Т. 60. № 5. С. 20–24.
5. Ласточкин А.Н., Бочарова Е.В., Егоров И.В. Прикладная геоморфология на основе общей теории геосистем. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008, 392 с.
6. Ласточкин А.Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. 762 с.
7. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 576 с.
8. Плисенко О.А. Моделирование элементарных геоморфных поверхностей на цифровых картах. Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием

современных информационных технологий. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Майкоп, 2017. С. 74–83.

9. *Плисенко О.А.* Применение экспертных систем в ГИС для пространственного анализа рельефа. *ИнтерКарто. ИнтерГИС*, 2016. Т. 22. № 1. С. 157–168. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-157-168.

10. *Татаренко В.И., Елишина Т.Е.* Приемы пространственного анализа исходных картографических данных при создании геоморфологических карт в среде ГИС. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2012. № 2–1. С. 105–109.

11. *Фирсов Ю.Г.* Цифровые модели рельефа дна и анализ батиметрических профилей для формирования внешней границы континентального шельфа России в Арктике. *Гео-Сибирь*, 2011. № S. С. 152–162.

12. *Флоринский И.В.* Геоморфометрия сегодня. *ИнтерКарто. ИнтерГИС*, 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 394–448. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

13. *Brändli, M.* Hierarchical models for the definition and extraction of terrain features. *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries. Gisdata II. London: Taylor & Francis*, 1996. P. 257–270. DOI: 10.1201/9781003062660.

14. *Minár J., Krcho J., Evans I.S.* Geomorphometry: Quantitative Land-Surface Analysis, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, 2016. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10260-X.

15. *Minár J., Evans I.S.* Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*, 2008. V. 95. No. 3–4. P. 236–259. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.06.003.

16. *Shary P.A.* Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical geology*, 1995. V. 27. No. 3. P. 373–390. DOI: 10.1007/BF02084608.

## REFERENCES

1. *Brändli M.* Hierarchical models for the definition and extraction of terrain features. *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries. Gisdata II. London: Taylor & Francis*, 1996. P. 257–270. DOI: 10.1201/9781003062660.

2. *Firsov Yu.G.* Digital models of the bottom relief and analysis of bathymetric profiles for the formation of the outer boundary of the continental shelf of Russia in the Arctic. *Geo-Siberia*, 2011. No. S. P. 152–162 (in Russian).

3. *Florinsky I.V.* Geomorphometry today. *InterCarto. InterGIS*, 2021. V. 27. Part 2. P. 394–448 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

4. *Kolbovsky E.Yu.* Geo-information modeling and mapping of landscape locations. *News of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography*, 2016. V. 60. No. 5. P. 20–24 (in Russian).

5. *Lastochkin A.N., Bocharova E.V., Egorov I.V.* Applied geomorphology based on the general theory of geosystems. *St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University*, 2008. 392 p. (in Russian)

6. *Lastochkin A.N.* System-morphological foundation of Earth's sciences. *St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University*, 2002. 762 p. (in Russian).

7. *Minár J., Evans I.S.* Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*, 2008. V. 95. No. 3–4. P. 236–259. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.06.003.

8. *Minár J., Krcho J., Evans I. S.* Geomorphometry: Quantitative Land-Surface Analysis, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, 2016. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10260-X.

9. *Nikulín E.A.* Computer geometry and algorithms of machine graphics. *St. Petersburg: BHV-Petersburg*, 2005. 576 p. (in Russian).

10. *Plisenko O.A.* Application of expert systems in GIS for spatial relief analysis. *InterCarto. InterGIS*. 2016. V. 22. No. 1. P. 157–168 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-157-168.

11. *Plisenko O.A.* Modeling of elementary geomorphic surfaces on digital maps. Applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies. Proceedings of IV International Scientific and Practical Conference. Maykop, 2017. P. 74–83 (in Russian).
  12. *Shary P.A.* Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical geology*, 1995. V. 27. No. 3. P. 373–390. DOI: 10.1007/BF02084608.
  13. *Tatarenko V.I., Elshina T.E.* Techniques for spatial analysis of initial cartographic data when creating geomorphological maps in a GIS environment. *News of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography*. 2012. No. 2–1. P. 105–109 (in Russian).
  14. *Varshanina T.P.* Prospects for forecasting environmentally significant natural hazards based on a structurally similar model. *Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural-mathematical and technical sciences*. 2011. No. 4. P. 128-137 (in Russian).
  15. *Varshanina T.P., Shekhov Z.A., Pyankov V.Yu.* GIS of ecologically balanced landscape-adaptive land use. *Landscape studies and Landscape Ecology: Coadaptation of landscape and Economic Activity: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Simferopol*, 2020. P. 82–86 (in Russian).
  16. *Zinchenko A.G., Lastochkin A.N.* Methodology of geomorphological mapping of the shelf and continental slope of the Russian Federation (in relation to the tasks of the State Geological Map-1000). Moscow: CJSC Geoinformmark, 2001. 38 p. (in Russian).
-