

Обнаружение многолетних бугров пучения с использованием декомпозиции цифровых моделей рельефа по топологическим признакам

С. В. Еремеев¹, А. В. Абакумов¹, Д. Е. Андрианов¹,
И. В. Богоявленский², Р. А. Никонов²

¹ Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Муром, 602252, Россия

E-mails: sv-eremeev@yandex.ru, artem210966@yandex.ru, AndrianovDE@inbox.ru

² Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, 119333, Россия
E-mails: igorbogoyavlenskiy@gmail.com, nikonovroman@gmail.com

В последнее десятилетие значительно возрос интерес к изучению геокриологических особенностей Арктики, что связано с расширением масштабов поиска и освоения ресурсов полезных ископаемых, особенно углеводородов. В статье описана технология автоматизированного обнаружения многолетних бугров пучения (МБП), нередко несущих угрозы мощных выбросов и взрывов газа, на цифровых моделях рельефа (ЦМР). В качестве исходных данных используются высокоточные цифровые модели рельефа Арктики ArcticDEM, построенные при фотограмметрической обработке космоснимков высокого разрешения. Разработанная технология поиска МБП, включающая программное обеспечение, базируется на использовании декомпозиции изображений по топологическим признакам. Данный метод позволяет сформировать набор топологических свойств из входной матрицы точек ЦМР и проводить их дальнейший анализ с последующей фильтрацией по заданным параметрам. Показаны особенности представления МБП, а также их отличия от других рельефообразующих объектов Арктики. Приведены численные и графические результаты обнаружения МБП на реальных данных севера Западной Сибири. Предложенный подход позволяет проводить анализ ЦМР по геометрическим и топологическим признакам. С использованием геометрических признаков средняя точность правильно выделенных объектов составляет 78,2 %, а с добавлением топологических свойств это значение увеличивается до 81,8 %.

Ключевые слова: многолетние бугры пучения (МБП), цифровые модели рельефа (ЦМР), ArcticDEM, декомпозиция изображений, топологические признаки

Одобрена к печати: 27.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-129-143

Введение

Со времени обнаружения первых гигантских кратеров газовых выбросов на п-ове Ямал в июле 2014 г. многими российскими и зарубежными исследователями ведётся непрерывная работа по анализу и изучению причин возникновения подобных объектов в криолитозоне Арктики. В августе – сентябре 2014 г. появились первые публикации, обосновывающие газодинамические причины образования этих кратеров (Богоявленский, 2014а, б). При анализе материалов по первому Бованенковскому кратеру было отмечено, что он образовался в результате «мощного выброса (пневматического выхлопа) газа из неглубокой подземной залежи, хотя возможно, что было и воспламенение (взрыв) газа, не оставившее следов на мёрзлой породе с большим содержанием льда, т.е. сработал газозрывной механизм (взрывоопасной является 5–16 % концентрация метана в воздухе). Наиболее вероятно, что залежь газа образовалась не в традиционном песчаном коллекторе, а в полости на месте постепенного вытаивания погребённого льда (пластового, жильного, ядра булгуньяха-гидролакколита-*pingo* и др.) с замещением ледового/водного пространства газом (термокарст)» (Богоявленский, 2014а, с. 14; Богоявленский, 2014б, с. 142–143). В последующие годы было обнаружено около 20 подобных кратеров, исследования которых подтвердили сформулированную выше модель их образования (Богоявленский, 2021).

Анализ ретроспективных космоснимков на участках обнаруженных кратеров показал, что на месте их образования существовали многолетние бугры пучения (МБП) (Богоявленский и др., 2021). Этот факт стал основанием для более тщательного изучения, каталогизации и картографирования существующих МБП сначала на Ямале (Богоявленский и др., 2019), а потом и на всём севере Западной Сибири. При выделении МБП в работе (Богоявленский и др., 2019) использовались обработка и визуальный анализ зимних космоснимков изучаемой территории, совмещённых с данными, полученными в результате экспедиций и с имеющихся в наличии топокарт. В дальнейшем для исследования формирования кратеров газовых выбросов и предшествующих им МБП были применены не только космоснимки, но и цифровые модели рельефа (ЦМР) (Богоявленский и др., 2020, 2021; Bogoyavlensky et al., 2021). Это позволило изучить процесс роста МБП, а также образования и дальнейшего разрушения сформировавшихся на их месте кратеров.

Одна из наиболее успешно используемых ЦМР при изучении МБП в Арктике — ArcticDEM, построенная на основе фотограмметрической обработки космоснимков (Porter et al., 2018). В начале база данных ArcticDEM содержала снимки с разрешением 1000 м/пиксель, в дальнейшем они были уточнены до 500, 100, 32, 10 и 2 м/пиксель. Наиболее высокое разрешение 2 м/пиксель позволило проводить поиск относительно небольших объектов, в том числе и МБП. Модель ArcticDEM охватывает всю территорию Арктики, имея в своей основе множество космоснимков высокого разрешения. Визуальный анализ этих снимков сильно замедляет поиск и картирование МБП, поэтому представляется важным максимально автоматизировать этот процесс на основе обработки данных ЦМР. Основная цель настоящей работы состоит в разработке и апробировании на реальных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) выделения МБП с использованием декомпозиции ЦМР по топологическим признакам.

Обзор существующих подходов

Автоматизированный анализ ЦМР ArcticDEM в настоящее время находит широкое применение для исследования различных объектов Арктики, включая обнаружение вулканических воздействий на морфологию поверхности ледника (Martin et al., 2021), анализ размеров ледников (Bagg et al., 2018), обнаружение айсбергов (Shiggins et al., 2023). Не менее важным становится исследование МБП, а также динамики их развития, что отражено в работах (Богоявленский и др., 2020; Бондур, 2022; Bogoyavlensky et al., 2021).

Рассмотрим основные подходы, используемые при автоматизации выделения МБП на ЦМР. Наиболее популярными представляются геоморфометрические методы, которые позволяют вычислить различные геометрические характеристики, включая высоту объектов, углы и кривизну их склонов, а также многие другие признаки (Иванов, Ермолаев, 2017; Лобанов и др., 2020). В современных геоинформационных системах существует богатый инструментарий для использования геоморфометрического анализа. С помощью настроек можно выбирать определённые параметры, которым будут соответствовать найденные объекты. Например, задать поиск только тех объектов, которые не превышают указанной высоты. При таком подходе в качестве результата вместе с МБП могут отображаться и другие объекты, которые не являются МБП, но имеют схожие геометрические характеристики.

Для более точного поиска вместе с геоморфометрическими признаками также широко используют текстурный анализ поверхности объектов. В работе (Ishalina et al., 2021) авторы вычисляют морфометрические переменные и текстурные особенности Харалика для выделения необходимых объектов в ледниках. В исследовании (Звягин, Мальцев, 2020) применяется оператор Собеля для построения контуров объектов «лёд – вода» на аэрофотоснимках, которые предварительно очищаются от шума с помощью вейвлет-преобразования Хаара.

Существует класс природных объектов, которые имеют овальную форму или форму круга. К ним также относятся МБП. Для автоматического выделения на цифровых снимках объектов круглой формы применяют различные подходы на основе преобразования Хафа (Chang

et al., 2019), которое основано на вычислении уравнения окружности для нахождения соответствующих объектов. Кроме того, для объектов круглой формы в определённой области деятельности разрабатываются отдельные математические модели, например для выделения кольцевых объектов на снимках (Беляев и др., 2011), определения цилиндрических и сферических поверхностей (Лисицын и др., 2019), сопоставления овалов между собой (Савчик, Николаев, 2018). Это говорит о том, что проблема выделения объектов заданной формы на снимках представляется сложной задачей и для её решения требуются новые подходы.

Материалы и методы

Особенности представления МБП на ArcticDEM

Модель ArcticDEM представляет собой разбитые на фрагменты области, которые охватывают территорию Арктики. Каждый фрагмент — это отдельный файл, записанный в формате GeoTiff размером 25×25 тыс. пикселей (с разрешением 2 м/пиксель) и объёмом от 2 до 7 Гбайт. На *рис. 1* (см. с. 132) показано покрытие ArcticDEM в виде файлов мозаики, а также отдельно взятый фрагмент. Здесь и в дальнейшем приводятся названия файлов, используемые в официальном хранилище ArcticDEM: <https://data.pgc.umn.edu/elev/dem/setsm/ArcticDEM/mosaic/v3.0/2m>.

Поиск МБП на основе космоснимков имеет некоторые ограничения. Основным недостатком заключается в том, что по тени не всегда удаётся выявить сам бугор, тогда как 3D-модель показывает охват МБП с разных сторон. Также визуальный анализ позволяет однозначно идентифицировать объект, в отличие от снимка, где из-за ограниченности визуальной информации шанс ошибки гораздо больше. Геометрически МБП представляет собой выпуклый объект, который имеет форму овала в основании и ряд параметров в некоторых диапазонах (*табл. 1*):

Таблица 1. Геометрические параметры МБП

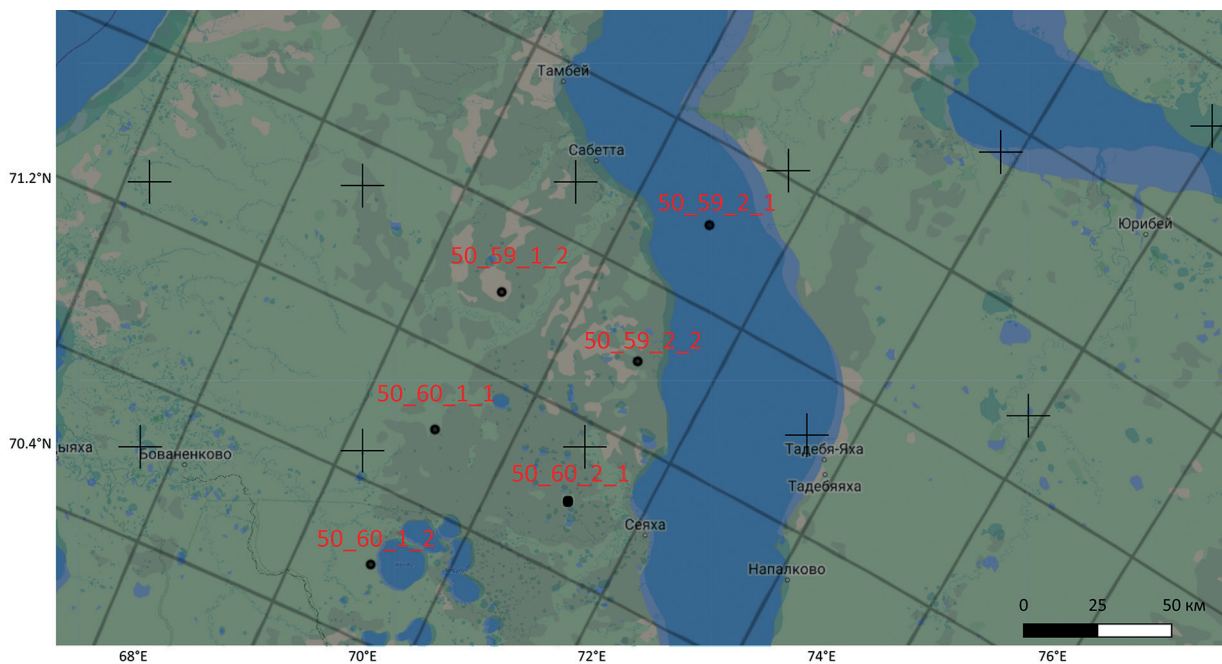
| Параметр | Диапазон значений |
|---|-------------------|
| 1. Диагональ | 1–50 м |
| 2. Высота | 2–6 м |
| 3. Максимальное соотношение сторон | 1,5 |
| 4. Степень округлости (1 — круг, 0 — квадрат) | 0,4–1 |

Наиболее очевидным вариантом для нахождения МБП на 3D-поверхности становится выделение всех объектов овальной формы и проверка на попадание параметров в диапазон из *табл. 1*. Выделение овальных объектов перебором очень сильно увеличивает время и затрудняет процесс обработки на больших данных.

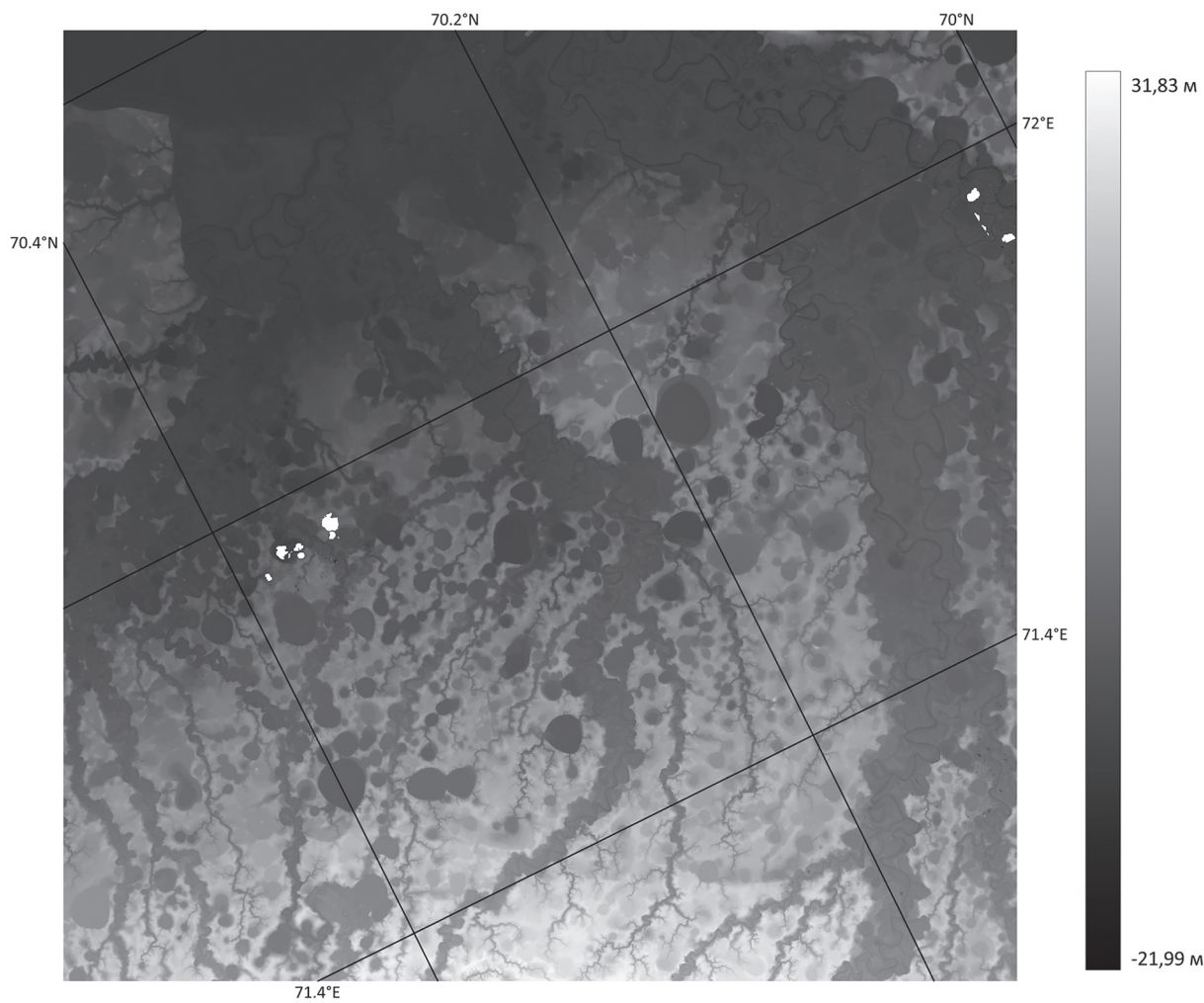
Покажем примеры выпуклых объектов с овальным основанием на ЦМР ArcticDEM, которые представляют собой МБП (*рис. 2а*, см. с. 133). Однако существуют объекты подобной формы, которые не являются МБП. Пример такого объекта виден на *рис. 2б*. В данном случае объект является бугорком у края скалы. Подобных случаев довольно много, поэтому даже простой перебор не поможет решить поставленную задачу, что подводит к необходимости разработки новых методов.

Предлагаемый подход

Для выделения потенциальных МБП будем использовать подход на основе разработанного нами ранее метода декомпозиции изображения по топологическим признакам (Еремеев и др., 2022). В данной работе применим этот подход для обработки 3D-объектов с учётом рассмотренных выше особенностей.

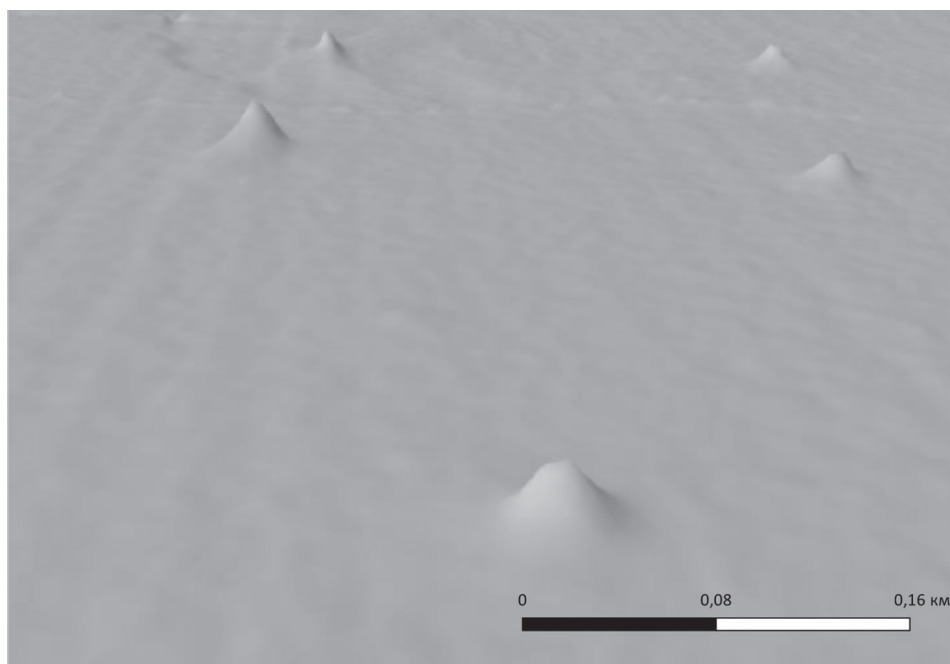


a

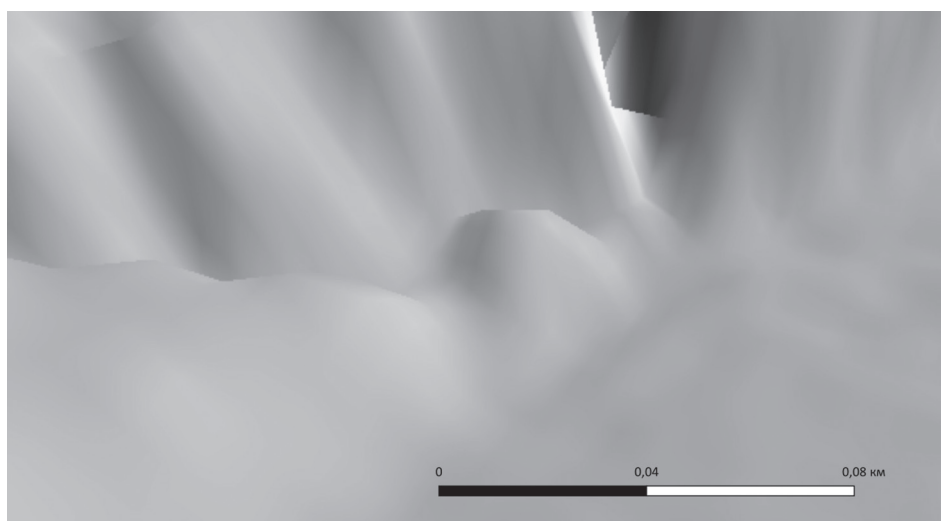


б

Рис. 1. Покрытие ArcticDEM: *a* — в виде файлов мозаики (район Сабеты, Сеяхи и Ямальных озёр); *б* — в формате GeoTiff (50_60_2_1_2m_v3.0_reg_dem-002.tif)



a



б

Рис. 2. Примеры объектов на ArcticDEM: *a* — МБП; *б* — выпуклый объект у скалы, который подходит по параметрам из табл. 1, но не является МБП

Выделим основные шаги предлагаемого подхода для обнаружения МБП на ЦМР:

Шаг 1. Считывание данных модели ArcticDEM.

Шаг 2. Разделение их на тайлы размером 1100×1100 пикселей с наложением 100 пикселей.

Шаг 3. Получение областей интереса (потенциальных МБП) путём декомпозиции ЦМР по топологическим признакам на каждом тайле.

Шаг 4. Отсечение нижних пикселей у всех областей интереса в соотношении 10 % от всей высоты.

Шаг 5. Фильтрация областей интереса по геометрическим параметрам, включая диаметр, высоту, коэффициент отношения длины к ширине и степень округлости.

Шаг 6. Фильтрация областей интереса по топологическим признакам.

Шаг 7. Отображение результата.

Рассмотрим теперь более подробно каждый из шагов.

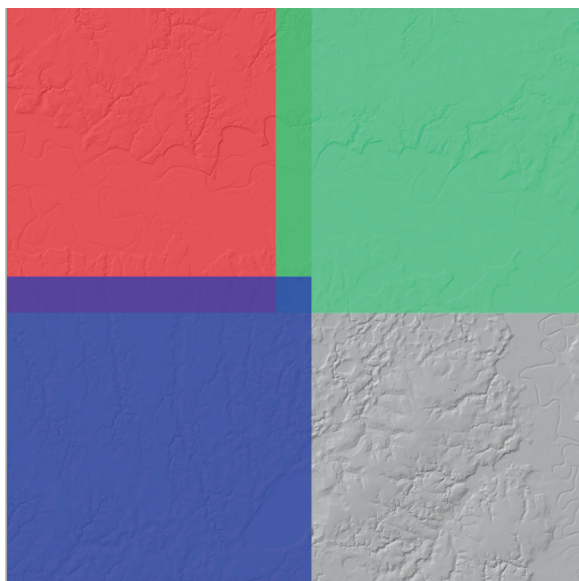


Рис. 3. Наложение тайлов; размер каждого тайла составляет 1100×1100 пикселей, размер области при наложении — 100 пикселей

На первом шаге представим ЦМР в виде матрицы $F = (p_{ij})_{m \times n}$, элементами которой являются значения высот в точках с координатами (i, j) ($1 \leq i \leq m$; $1 \leq j \leq n$), где m и n — количество строк и столбцов матрицы соответственно. В работе используются фрагменты ЦМР, в которых $m = 25\,000$ и $n = 25\,000$. В связи с большими объёмами модели на втором шаге разделим её на отдельные части, называемые тайлами. Разделение происходит с наложением, т. е. каждый предыдущий тайл захватывает часть соседей, как показано на рис. 3. Это необходимо, так как возможно, что потенциальный объект попадёт именно на

границу. Очевидно, что зона наложения должна быть не уже максимального размера объекта.

На третьем шаге происходит обработка тайлов. Каждый тайл представляет собой подматрицу исходной матрицы F . Рассмотрим отдельно взятую подматрицу $A = (a_{ij})_{u \times v}$ ($u = 1100$, $v = 1100$) и покажем процесс её декомпозиции по топологическим признакам, что позволит в результате получить множество потенциальных МБП.

Для этого на каждой высоте h от максимального $h_{\max} = \max(a_{ij})$ до минимального $h_{\min} = \min(a_{ij})$ значений элементов матрицы A с шагом $\Delta h = -1$ будем разделять элементы a_{ij} на два подмножества: элементы со значениями $a_{ij} \geq h$ и все остальные. Будем анализировать те элементы, значения которых не ниже h . На начальном этапе при $h = h_{\max}$ из всех элементов матрицы A будут отобраны только те, которые удовлетворяют условию $a_{ij} = h$. Количество таких элементов может быть больше одного. Если около элемента есть соседи с таким же максимальным значением высоты, то будем считать эти элементы связными. Для a_{ij} соседними элементами будут $a_{i-1,j}$, $a_{i+1,j}$, $a_{i,j-1}$, $a_{i,j+1}$ при условии, что индексы i и j не выходят за границы матрицы. Множество связных элементов образует компоненту связности. Компонента связности может состоять из одного или нескольких элементов. Таким образом, на начальном этапе формируются самые ранние компоненты связности, каждую из которых будем описывать с помощью матриц.

Пусть $J = (b_{ij})_{u \times v}$ — матрица для компоненты связности, размеры которой совпадают с размерами матрицы A . При начальном $h = h_{\max}$ элементы b_{ij} содержат следующие значения:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_{ij} = h_{\max}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad \text{При изменении } h = h + \Delta h \text{ получим также разделение всех элементов}$$

матрицы A на два множества. У существующих компонент связности могут появиться новые соседние элементы, которые будут включены в эти компоненты. Также могут образоваться новые компоненты. Кроме того, в качестве соседних элементов могут появиться другие компоненты связности, в результате чего происходит их объединение. При этом более поздняя созданная компонента прекращает своё существование. Элементы b_{ij} на каждом шаге h будут

$$\text{уточняться по формуле: } b_{ij} = \begin{cases} b_{ij} + 1, & \text{если } a_{ij} \geq h, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad \text{для } h = h_{\max} + \Delta h, h_{\max} + 2\Delta h, \dots, h_{\min}.$$

Рассматриваются только связные элементы, принадлежащие одной компоненте. В результате такого итерационного процесса получим все компоненты, которые представим матрицами J_1, J_2, \dots, J_p . При этом исходная матрица будет выражаться через их алгебраическую сумму:

$$A = J_1 + J_2 + \dots + J_p,$$

где p — количество матриц.

Покажем численный пример декомпозиции для матрицы $A = \begin{pmatrix} 3 & 3 & 1 & 4 \\ 4 & 1 & 3 & 3 \\ 4 & 5 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$. При $h = 5$ будет сформирована матрица $J_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, состоящая пока из одного ненулевого элемента. При $h = 4$ за счёт соседних элементов матрица J_1 примет вид: $J_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$; кроме того, формируется матрица $J_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$. При $h = 3$ уже имеем три матрицы: $J_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, $J_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ и $J_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. На этапе при $h = 2$ происходит слияние компонент с номерами 2 и 3, в результате чего матрица J_3 не будет больше изменяться, а остальные примут вид: $J_1 = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, $J_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. При $h = 1$ компонента с номером 1 поглощает компоненту с номером 2.

Итоговая декомпозиция выглядит так: $A = J_1 + J_2 + J_3$, а именно:

$$\begin{pmatrix} 3 & 3 & 1 & 4 \\ 4 & 1 & 3 & 3 \\ 4 & 5 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & 3 & 1 & 1 \\ 4 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 5 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для визуализации итерационный процесс анализа фрагмента ЦМР по предложенному подходу схематично показан на *рис. 4* (см. с. 136).

Полученные матрицы J_1, J_2, \dots, J_p позволяют в результате их анализа обнаружить МБП. Можно сказать, что каждая из матриц описывает на ЦМР некоторую область интереса, среди которых есть потенциальные МБП. Для анализа информации будем использовать топологические признаки.

Топологические признаки по всем матрицам J_1, J_2, \dots, J_p отражены в баркоде, который определяется как множество пар значений: высота $birth_k$, на которой появилась компонента, и высота $death_k$, где компонента была поглощена другой:

$$Barcode = \{(birth_k, death_k)_{k=1}^p\}.$$

Пример баркода показан на *рис. 4д* и отражает топологическую структуру фрагмента ЦМР. Каждая из компонент начинает своё существование при значениях высоты 10, 9 и 8. А например, при $h = 6$ компонента под номером 4 прекращает существование, так как её поглощает другая компонента под номером 3. Наиболее длинные отрезки баркода характеризуют устойчивые топологические признаки, т.е. глобальные структуры, которые поглощают другие компоненты. Короткие отрезки соответствуют очень мелким областям интереса, которые можно принять за шум и не анализировать в дальнейшем.

Пример визуализации всех построенных компонент для фрагмента ЦМР показан на *рис. 5* (см. с. 136).

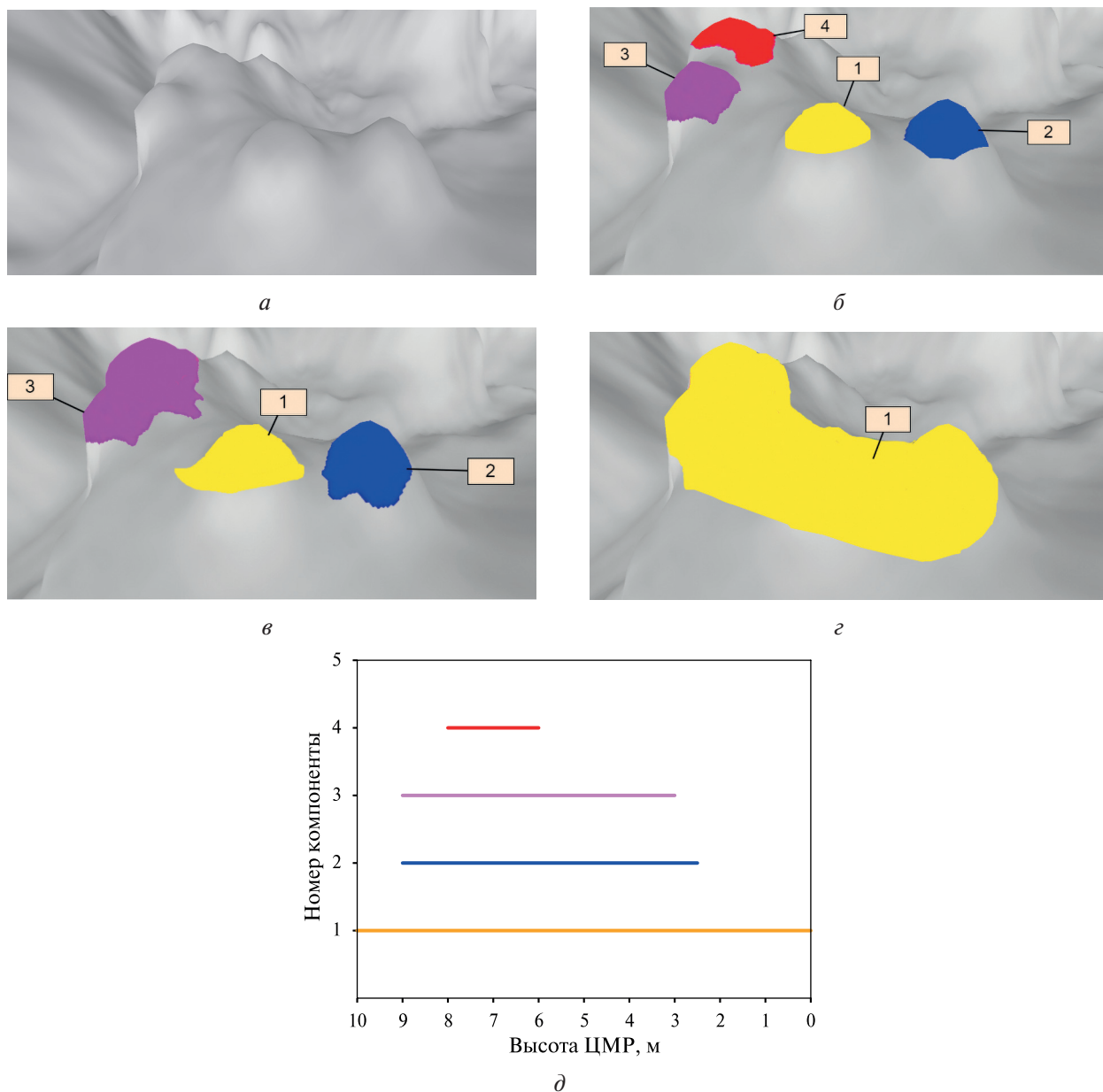


Рис. 4. Процесс формирования и поглощения компонент на ЦМР: *a* — фрагмент исходного объекта; *б–г* — визуальное отображение компонент с учётом поглощения более поздних сформированных компонент; *д* — баркод, отображающий топологическую структуру фрагмента ЦМР

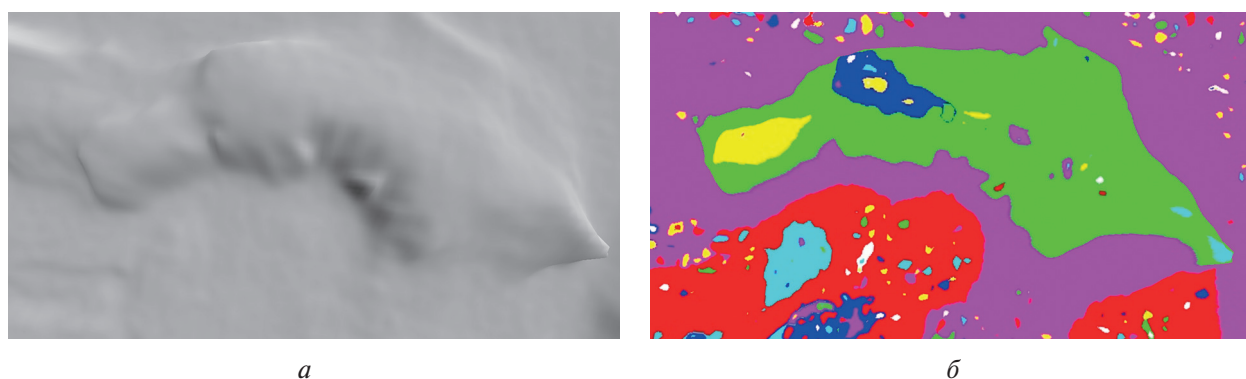


Рис. 5. Визуальное представление всех сформированных компонент на ЦМР: *a* — фрагмент ЦМР в 3D-виде; *б* — отображение всех сформированных компонент на ЦМР в 2D-представлении

Довольно часто случается, что область интереса захватывает часть фона, поэтому желательно провести небольшую предобработку. На шаге 4 используем отсечение нижних пикселей у всех областей интереса. В данном случае берётся порог в 5–10 % от высоты области интереса и отбрасываются все пиксели, у которых значение меньше. Этот процесс проиллюстрирован на *рис. 6*. Если объект не слишком большой относительно размеров тайла, то он добавляется в список потенциальных МБП.

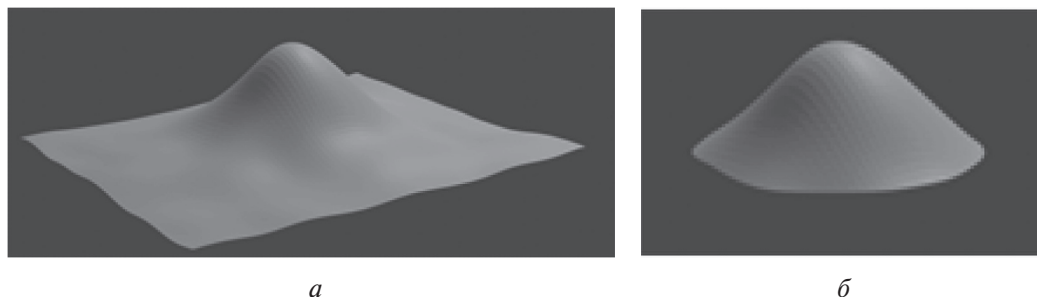


Рис. 6. Срез МБП: *a* — исходная поверхность; *b* — бугор после обработки

Геометрические параметры областей интереса также можно посчитать на основе информации из матриц J_1, J_2, \dots, J_p . После того как все области интереса будут найдены, начинается шаг 5 — процесс поиска самих МБП по заданным параметрам, указанным в *табл. 1*. Главной в данном процессе является проверка по размеру, так как она отсеивает большинство ложных областей интереса. Однако возможен случай, когда бугор на самом деле является частью горы, как показано на *рис. 2б*. Для проверки такой ситуации необходим ещё один этап. Вокруг потенциального МБП анализируется зона. Если есть координаты, в которых значение высоты сильно ниже минимальной высоты потенциального МБП (разница как минимум составляет высоту самого МБП), то такая область интереса также отсеивается.

Чтобы оценить численно степень округлости МБП по его контуру у основания, разработан отдельный алгоритм. Проверка на округлость найденного контура МБП может быть реализована разными способами, но в данном случае была важна вычислительная эффективность способа. Предложен простой и эффективный алгоритм определения степени округлости на основе статистики направлений при обходе контура. Алгоритм проходит вдоль контура МБП и вычисляет направление вектора между соседними координатами. Затем определяется количество векторов для каждого из восьми направлений. У объекта круглой формы количество векторов каждого типа будет одинаковым. Пример продемонстрирован на *рис. 7*.

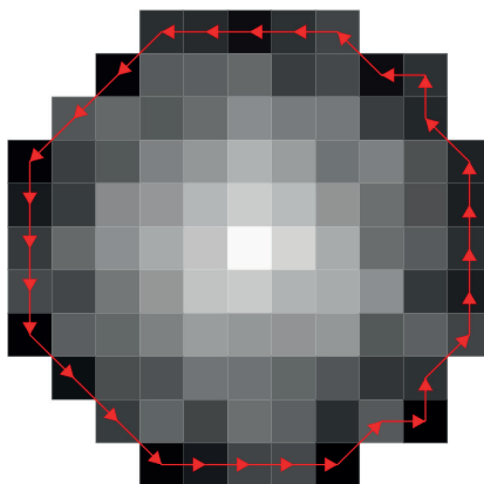


Рис. 7. Схема анализа контура

В данном случае получается распределение, показанное в *табл. 2*.

Таблица 2. Распределение количества векторов для каждого направления при анализе контура

| Направление | Количество векторов |
|------------------|---------------------|
| Западное | 5 |
| Юго-западное | 3 |
| Южное | 4 |
| Юго-восточное | 3 |
| Восточное | 5 |
| Северо-восточное | 2 |
| Северное | 6 |
| Северо-западное | 2 |

Степень округлости f будем вычислять по формуле:

$$f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^8 |r_i - W|}{S},$$

где S — общее количество векторов по всем направлениям; W — среднее значение среди всех направлений; r_i — количество векторов по каждому направлению ($i = 1, 2, \dots, 8$).

В данном случае из *табл. 2* получим: $S = 20$, $W = 30/8 = 3,75$, $f = 1 - \frac{1,25 + 0,75 + 0,25 + 0,75 + 1,25 + 1,75 + 2,25 + 1,75}{30} = 0,67$, т.е. 67%. Если же на вход алгоритму поступит квадрат, то, согласно формулам, его степень округлости будет равна 0.

На шаге 6 среди всех оставшихся после предыдущих шагов фильтрации областей интереса будем обрабатывать только те, которые наиболее близки для МБП по топологическим признакам. Для этого заранее подсчитаем топологические признаки из эталонных МБП. Баркод каждого потенциального МБП сравнивается с базой эталонов, и таким образом, происходит дополнительное отсеивание.

На заключительном шаге происходит отображение на ЦМР найденных МБП.

Экспериментальные исследования

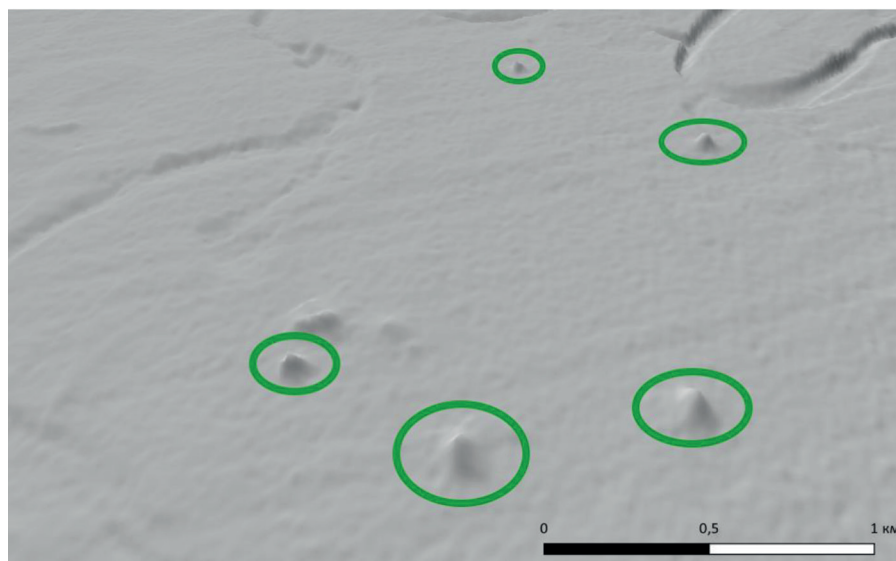
Итоговый алгоритм был проверен на пяти больших фрагментах 25×25 тыс. пикселей, результаты приведены в *табл. 3*.

Таблица 3. Численные результаты поиска МБП на ЦМР ArcticDEM

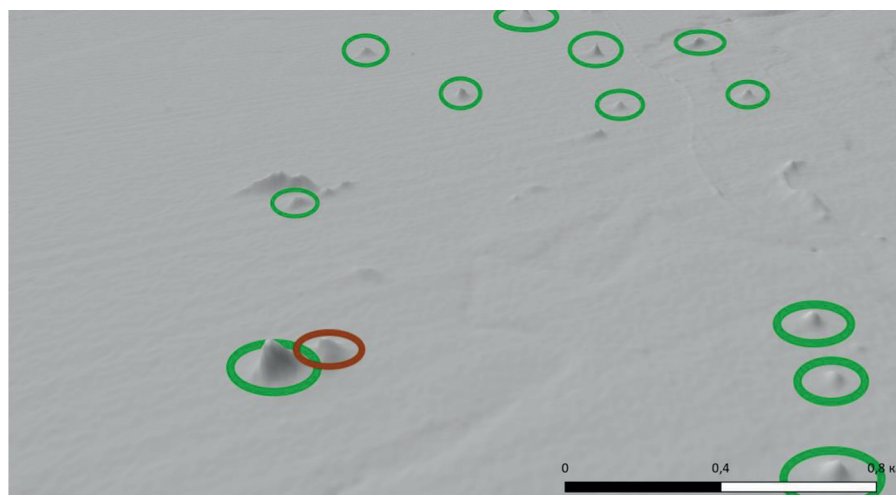
| Номер фрагмента Arctic Dem | Правильно выделенные МБП по геометрическим параметрам, % | Правильно выделенные МБП по геометрическим и топологическим признакам, % |
|----------------------------|--|--|
| 50_59_1_2_2m | 79 | 79 |
| 50_59_2_1_2m | 84 | 88 |
| 50_59_2_2_2m | 76 | 79 |
| 50_60_1_1_2m | 69 | 74 |
| 50_60_1_2_2m | 83 | 89 |
| Итого | 78,2 | 81,8 |

Анализ результатов показывает, что использование топологических признаков увеличивает точность правильно найденных МБП на ЦМР. Это подтверждается в четырёх экспе-

риментах из пяти. Наиболее высокий процент правильно найденных МБП показал эксперимент с файлом 50_60_1_2_2m. Графические результаты работы данного алгоритма на нескольких фрагментах ЦМР показаны на *рис. 8*.



а



б

Рис. 8. Графическое отображение результатов работы предложенного подхода — найденные МБП на фрагментах ЦМР; зелёным цветом отмечены области найденных МБП, а коричневым цветом показаны участки, которые не прошли проверку по топологическим признакам

Визуализация результатов позволит специалисту провести интерпретацию найденных объектов на ЦМР в 3D-режиме. Программный код для автоматического обнаружения МБП на ArcticDEM с возможностью 3D-отображения доступен по ссылке <https://github.com/Noremos/QArcticViewer>.

Заключение

Процесс поиска многолетних бугров пучения на ЦМР и космоснимках считается нетривиальной задачей даже для специалиста, поэтому создание подобного метода для решения данной задачи является столь необходимым. Разработан метод, в основе которого лежит

использование декомпозиции ЦМР по топологическим признакам. Декомпозиция ЦМР позволяет найти области интереса с потенциальными буграми пучения, а также проводить фильтрацию найденных объектов по геометрическим и топологическим параметрам. С использованием геометрических признаков средняя точность правильно выделенных объектов составляет 78,2 %, а с применением топологических свойств это значение увеличивается до 81,8 %. Данная точность вполне допустима, учитывая ограниченное время существования бугров и большой объём данных.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-21-10064, <https://rscf.ru/project/23-21-10064/>.

Литература

1. *Беляев М. Ю., Виноградов П. В., Десинов Л. В., Кумакшев С. А., Секерж-Зенькович С. Я.* Идентификация по фотоснимкам из космоса источника океанских кольцевых волн вблизи острова Дарвин // Изв. Российской акад. наук. Теория и системы управления. 2011. № 1. С. 70–83.
2. *Богоявленский В. И.* (2014а) Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала // Бурение и нефть. 2014. № 9. С. 13–18.
3. *Богоявленский В. И.* (2014б) Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов // Тр. Вольного экон. о-ва России. Т. 182. М.: Изд-во ВЭО России, 2014. № 3. С. 12–175.
4. *Богоявленский В. И.* Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 51–66. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-51-66>.
5. *Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В. и др.* Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. 2019. № 4(36). С. 52–68. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-4-52-68>.
6. *Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н., Никонов Р. А.* Цифровые технологии дистанционного выявления и мониторинга развития бугров пучения и кратеров катастрофических выбросов газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2020. Т. 40. № 4. С. 90–105. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-90-105>.
7. *Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н.* Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 3. С. 363–374. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-362-374>.
8. *Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Кирбижекова И. И., Дмитриев А. В.* Радиолокационное обнаружение аномальной динамики бугров пучения на примере Ямальского бугра/кратера 2020 г. // Докл. Российской акад. наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 1. С. 65–72. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602575>.
9. *Еремеев С. В., Абакумов А. В., Андрианов Д. Е., Титов Д. В.* Метод разложения изображения по топологическим признакам // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 6. С. 939–947. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-СО-1080>.
10. *Звягин К. Н., Мальцев Д. Д.* К вопросу о подавлении цифрового шума при автоматическом построении контуров объектов «лед–вода» при обработке ледовой информации // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 1. С. 102–114. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-102-114>.
11. *Иванов М. А., Ермолаев О. П.* Геоморфометрический анализ бассейновых геосистем Приволжского федерального округа по данным SRTM и Aster GDEM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 98–109. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109>.
12. *Лисицын В. М., Обросов К. В., Сафонов В. А.* Выделение и определение параметров цилиндрических и сферических поверхностей при сегментации дальностных лазерно-локационных изображений // Изв. Российской акад. наук. Теория и системы управления. 2019. № 6. С. 103–118.
13. *Лобанов Г. В., Зверева А. Ю., Протасова А. П. и др.* Геоморфологическое районирование на основе цифровых моделей рельефа (по данным SRTM для Верхнего Поднепровья) // Геоморфология. 2020. № 3. С. 44–55. <https://doi.org/10.31857/S0435428120030074>.

14. Савчик А. В., Николаев П. П. Метод проективного сопоставления для овалов с двумя отмеченными точками // Информац. технологии и вычисл. системы. 2018. № 1. С. 60–67.
15. Barr I., Dokukin M., Kougkoulos I. et al. Using ArcticDEM to analyse the dimensions and dynamics of debris-covered glaciers in Kamchatka, Russia // *Geosciences*. 2018. V. 8. No. 6. P. 216–233. <https://doi.org/10.3390/geosciences8060216>.
16. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. Permanent gas emission from the Seyakha crater of gas blowout, Yamal Peninsula, Russian Arctic // *Energies*. 2021. V. 14. Article 5345. <https://doi.org/10.3390/en14175345>.
17. Chang Y., Bailey D., Le Moan S. The shape of patterns tells more: Using two dimensional Hough transform to detect circles // *Proc. 5th Asian Conf. Pattern Recognition (ACPR 2019)*. 2019. V. 12047. P. 64–75.
18. Ishalina O. T., Bliakharskii D. P., Florinsky I. V. Recognition of crevasses with high-resolution digital elevation models: application of geomorphometric modeling and texture analysis // *Trans. GIS*. 2021. V. 25. No. 5. P. 2529–2552.
19. Martin M. D., Barr I., Edwards B. et al. Assessing the use of optical satellite images to detect volcanic impacts on glacier surface morphology // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 17. Article 3453. <https://doi.org/10.3390/rs13173453>.
20. Porter C., Morin P., Ian H. et al. ArcticDEM, Version 3. Harvard Dataverse, V1. 2018. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>.
21. Shiggins C. J., Lea J. M., Brough S. Automated ArcticDEM iceberg detection tool: insights into area and volume distributions, and their potential application to satellite imagery and modelling of glacier–iceberg–ocean systems // *The Cryosphere*. 2023. V. 17. P. 15–32. <https://doi.org/10.5194/tc-17-15-2023>.

Detection of perennial heaving mounds in digital elevation model images using decomposition by topological features

S. V. Ereemeev¹, A. V. Abakumov¹, D. E. Andrianov¹,
I. V. Bogoyavlensky², R. A. Nikonov²

¹ *Murom Institute (Branch) of Vladimir State University, Murom 602252, Russia*
E-mails: sv-eremeev@yandex.ru, artem210966@yandex.ru, AndrianovDE@inbox.ru

² *Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow 119333, Russia*
E-mails: igorbogoyavlenskiy@gmail.com, nikonovroman@gmail.com

In the past decade, interest in studying the geocryological features of the Arctic has increased significantly, which is associated with the expansion of the search for and development of mineral resources, especially hydrocarbons. The article describes the technology for automated detection of perennial heaving mounds (PHM), often posing the threat of powerful gas blowouts and explosions, on digital elevation models (DEMs). ArcticDEM high-precision DEMs of the Arctic, built by photogrammetric processing of high-resolution satellite images, are used as initial data. The developed PHM search technology, including software, is based on the use of image decomposition based on topological features. This method allows one to generate a set of topological properties from the input matrix of DEM points and carry out their further analysis with subsequent filtering according to specified parameters. The features of PHM presentation are shown, as well as their differences from other relief-forming objects of the Arctic. Numerical and graphical results of PHM detection using real data from the north of Western Siberia are presented. The proposed approach makes it possible to analyze the DEM by geometric and topological features. With the use of geometric features, the average accuracy of correctly selected objects is 78.2 %, and with the addition of topological properties, this value increases to 81.8 %.

Keywords: perennial heaving mounds (PHM), digital elevation models (DEM), ArcticDEM, image decomposition, topological features

Accepted: 27.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-129-143

References

1. Belyaev M. Yu., Vinogradov P. V., Desinov L. V., Kumakshev S. A., Sekerzh-Zen'Kovich S. Ya., Identification of a source of oceanic ring waves near Darwin's island based on space photos, *J. Computer and Systems Sciences Intern.*, 2011, No. 1, pp. 70–83 (in Russian).
2. Bogoyavlensky V. I. (2014a), The threat of catastrophic gas blowouts from the Arctic cryolithozone. Yamal craters, *Oil and Drilling*, 2014, No. 9, pp. 13–18 (in Russian).
3. Bogoyavlensky V. I. (2014b), Arctic and the World Ocean: current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production, *Trudy VEO Russia*, 2014, Vol. 182, No. 3, pp. 12–175 (in Russian).
4. Bogoyavlensky V. I., Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic, *Arctic: Ecology and Economy*, 2021, Vol. 11, No. 1, pp. 51–66 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66.
5. Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V. et al., Earth Degassing in the Arctic: Comprehensive Studies of the Distribution of Frost Mounds and Thermokarst Lakes with Gas Blowout Craters on the Yamal Peninsula, *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, No. 4(36), pp. 52–68 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68.
6. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A., Digital technologies for remote detection and monitoring of the development of heaving mounds and craters of catastrophic gas blowouts in the arctic, *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, Vol. 40, No. 4, pp. 90–105 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-90-105.
7. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Catastrophic gas blowout in 2020 on the Yamal Peninsula in the Arctic. Results of comprehensive analysis of aerospace RS data, *Arctic: Ecology and Economy*, 2021, Vol. 11, No. 3, pp. 362–374 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-362-374.
8. Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N., Kirbizhekova I. I., Dmitriev A. V., Radar detection of anomalous dynamics of perennial heaving mounds from the example of the Yamal mound/crater in 2020, *Doklady Earth Sciences*, 2022, Vol. 506, No. 1, pp. 65–72 (in Russian), DOI: 10.31857/S2686739722602575.
9. Eremeev S. V., Abakumov A. V., Andrianov D. E., Titov D. V., Image decomposition method by topological features, *Computer Optics*, 2022, Vol. 46, No. 6, pp. 939–947 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1080.
10. Zvyagin K. N., Maltsev D. D., Revisiting the digital noise reduction in automatic contouring of “ice-water” objects, *Arctic and Antarctic Research*, 2020, Vol. 66, No. 1, pp. 102–114 (in Russian), DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-1-102-114.
11. Ivanov M. A., Yermolaev O. P., Geomorphometric analysis of river basins of the Volga Federal District using SRTM and Aster GDEM data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 98–109 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109.
12. Lisitsyn V. M., Obrosov K. V., Safonov V. A., Detection of Cylindrical and Spherical Surfaces and Determining Their Parameters in Segmentation of Range Images, *J. Computer and Systems Sciences Intern.*, 2019, Vol. 58, No. 6, pp. 945–959, DOI: 10.1134/S106423071906011X.
13. Lobanov G. V., Zvereva A. Yu., Protasova A. P. et al., Geomorphological zonation based on digital elevation models (from SRTM data over the Upper Dnieper region), *Geomorfologiya*, 2020, No. 3, pp. 44–55 (in Russian), DOI: 10.31857/S0435428120030074.
14. Savchik A. V., Nikolaev P. P., Projective correspondence method for an oval with two fixed points, *J. Information Technologies and Computing Systems*, 2018, No. 1, pp. 60–67 (in Russian).
15. Barr I., Dokukin M., Kougkoulos I. et al., Using ArcticDEM to analyse the dimensions and dynamics of debris-covered glaciers in Kamchatka, Russia, *Geosciences*, 2018, Vol. 8, No. 6, pp. 216–233, DOI: 10.3390/geosciences8060216.
16. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al., Permanent gas emission from the Seyakha crater of gas blowout, Yamal Peninsula, Russian Arctic, *Energies*, 2021, Vol. 14, Article 5345, DOI: 10.3390/en14175345.
17. Chang Y., Bailey D., Le Moan S., The shape of patterns tells more: Using two dimensional Hough transform to detect circles, In: *Proc. 5th Asian Conf. Pattern Recognition (ACPR 2019)*, 2019, Vol. 12047, pp. 64–75.
18. Ishalina O. T., Bliakharskii D. P., Florinsky I. V., Recognition of crevasses with high-resolution digital elevation models: application of geomorphometric modeling and texture analysis, *Trans. GIS*, 2021, Vol. 25, No. 5, pp. 2529–2552.
19. Martin M. D., Barr I., Edwards B. et al., Assessing the use of optical satellite images to detect volcanic impacts on glacier surface morphology, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 17, Article 3453, DOI: 10.3390/rs13173453.
20. Porter C., Morin P., Ian H. et al., ArcticDEM, Version 3, *Harvard Dataverse*, V1, 2018, DOI: 10.7910/DVN/OHHUKH.

21. Shiggins C. J., Lea J. M., Brough S., Automated ArcticDEM iceberg detection tool: insights into area and volume distributions, and their potential application to satellite imagery and modeling of glacier–iceberg–ocean systems, *The Cryosphere*, 2023, Vol. 17, pp. 15–32, DOI: 10.5194/tc-17-15-2023.