

Геоморфометрические признаки карстового процесса на равнинных лесопокрытых территориях (на примере Двинско-Мезенской карстовой провинции)

Е. В. Полякова, Ю. Г. Кутинов, А. Л. Минеев, З. Б. Чистова

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаврова УрО РАН, Архангельск, 163020, Россия
E-mail: lenpro26@yandex.ru*

Приведена характеристика Двинско-Мезенской карстовой провинции, определена степень закарстованности карбонатных и сульфатных пород. На основе геоморфометрического анализа цифровой модели рельефа рассчитаны параметры и выделены геоморфометрические признаки карстового процесса. При совместном использовании математического (кластерного) и содержательного (предметного) анализа можно устанавливать пространственные взаимосвязи между характеристиками рельефа и степенью закарстованности территории. Установлено, что развитие карстового процесса проявляется в высоких и средних значениях таких параметров рельефа, как угол наклона, индексы расчленённости рельефа и потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор). Их максимальные значения в целом приурочены к границам возвышенностей рельефа, а на более детальном уровне — к долинам рек и отображают проявление карста на поверхности. Такие расчётные характеристики, как плотность гидро-сети, плотность бессточных впадин на цифровой модели рельефа и плотность распределения болот по территории исследования, имеют обратную взаимосвязь с проявлением карстового процесса — чем ниже их значения, тем более ярко выражен процесс карстообразования и карстопроявления на исследуемой территории.

Ключевые слова: Двинско-Мезенская карстовая провинция, Беломорско-Кулойское плато, цифровая модель рельефа, геоморфометрические параметры, карст

Одобрена к печати: 04.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-173-183

Введение

Карст, с одной стороны, является уникальным геологическим процессом, формирующим на поверхности своеобразные карстово-денудационные, карстово-суффозионные и другие формы рельефа, создаёт живописные каньоны, лога и пещерные образования. С другой — представляет собой значительную опасность при ведении инженерно-геологических работ, развитии инфраструктуры, использовании сельскохозяйственных земель и прочее, что наносит определённый ущерб народному хозяйству и населению в целом (Полякова и др., 2021). Но и сама хозяйственная деятельность на закарстованных территориях может провоцировать развитие новых природных процессов, которые ранее здесь либо отсутствовали, либо не проявлялись (Опасные..., 1999).

Порядка 32 % материковой площади Архангельской области подвержено карстообразованию. Литологически здесь распространены карбонатный и сульфатный типы карста. Сульфатный карст занимает значительно меньшие площади, чем карбонатный, но проявляется более динамично, разнообразно и сосредоточенно (Шаврина, 2018; Шаврина и др., 2007). Максимальная карстовая активность в современных условиях отмечается на Беломорско-Кулойском плато (БКП) в условиях северной тайги. Эта территория представляется уникальной, поскольку здесь, с одной стороны, ещё сохранены нетронутые коренные темнохвойные леса, а с другой — ведётся активная разработка алмазов открытым карьерным способом, осуществляется разведка новых месторождений. Изучение карстового процесса прямыми натурными способами имеет ряд сложностей, поскольку на этой территории практически не развита инфраструктура, основное передвижение осуществляется по рекам, лесовозным дорогам и зимникам. А исследования с помощью космических снимков усложняются

наличием сплошного лесного покрова (Полякова и др., 2023). В этой связи цифровое моделирование рельефа может выступать своевременным объективным инструментом, позволяющим производить количественные расчёты и определять геоморфометрические признаки карстового процесса. Поэтому цель исследования — выделить и обозначить геоморфометрические признаки, которые будут характеризовать проявление и активность современного карста на территории Двинско-Мезенской карстовой провинции Архангельской области.

Характеристика района исследования

На схеме районирования карста Русской равнины (Чикишев, 1978) территория Архангельской области соответствует Онежско-Кулойской карстовой области, которая охватывает северную часть Русской равнины. В области выделяются две карстовые провинции: Двинско-Мезенская (правобережная часть реки Северной Двины) и Онего-Двинская (левобережная часть реки Северной Двины).

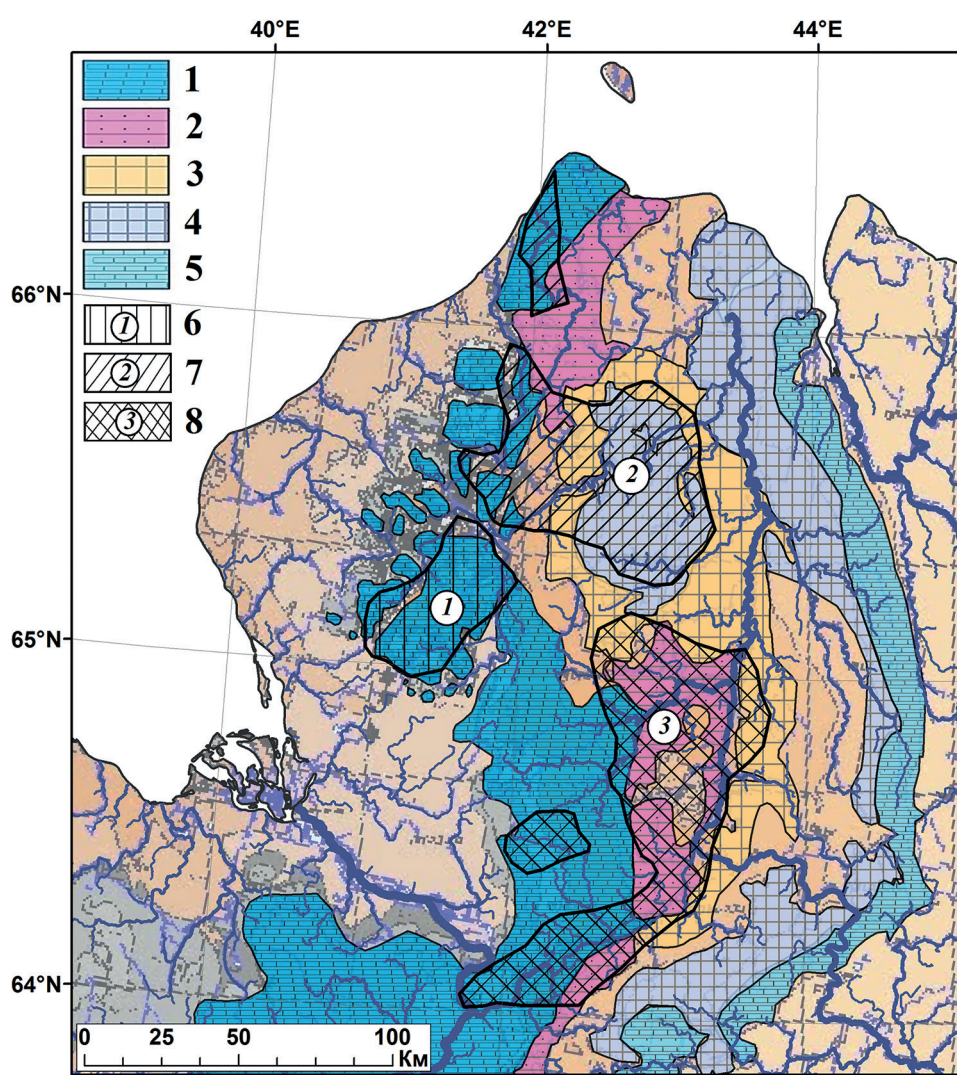


Рис. 1. Распространение карстующихся пород на территории Двинско-Мезенской карстовой провинции и степень их закарстованности: 1 — карбонатные породы среднего и верхнего карбона и ассельского яруса нижней перми; 2 — сульфатно-карбонатные породы сакмарского яруса нижней перми; 3 — терригенно-сульфатные породы уфимского яруса верхней перми; 4 — карбонатно-терригенные породы нижнекамского яруса верхней перми; 5 — карбонатные породы верхнекамского яруса верхней перми; 6–8 — закарстованность: 6 — низкая, 7 — средняя, 8 — высокая

Двинско-Мезенская карстовая провинция занимает междуречье нижнего течения рек Северной Двины и Мезени. Мощность палеозойских осадочных отложений, несогласно залегающих на выравненной поверхности протерозойских пород, увеличивается к юго-востоку от 500 до 1500 м. Территория сложена известняками, доломитами, гипсами, ангидритами, мергелями, аргиллитами, алевролитами и песчаниками каменноугольного и пермского возрастов. Верхнепалеозойские породы характеризуются слабым падением на восток-северо-восток. В том же направлении отмечается смена древних отложений (средний карбон) более молодыми (верхняя пермь). Каменноугольные и пермские образования почти повсеместно прикрыты плащом песчано-глинистых четвертичных осадков, преимущественно ледникового происхождения. Рельеф — плоскоравнинный. Большую часть провинции занимает БКП, на юге и востоке переходящее в низменную пологохолмистую равнину (Чикишев, 1978).

Современный карст Двинско-Мезенской карстовой провинции наиболее активен в гипсово-доломитовых отложениях нижней перми, отличающихся сильной тектонической трещиноватостью (рис. 1, см. с. 174). Здесь широко представлены воронки, котловины, колодцы, поноры, расщелины, исчезающие речки и пещеры. Повсюду обнаружены молодые провалы. В карбонатных отложениях каменноугольного и верхнепермского возраста карстовые процессы менее активны. Здесь отмечены преимущественно небольшие воронки, каверны и полости до 2–5 м в поперечнике (Чикишев, 1978).

В табл. 1 приведена характеристика трёх выделенных районов закарстованности.

Таблица 1. Характеристика районов закарстованности Двинско-Мезенской карстовой провинции

Район, закарстованность	Территория	Характеристика карста
1 — низкая	Западная и центральная часть территории БКП, бассейны рек Пачуги и Кепины	Подземный карбонатный карст. Отмечены небольшие воронки, каверны и полости. Полости интенсивного карста встречаются на глубине до 100 м от поверхности массивов. С районами карбонатного карста связаны основные месторождения пресных подземных вод (на данной территории — Пачутское месторождение (Малов, 2003))
2 — средняя	Северная и центральная часть территории БКП, бассейн реки Сояны	Открытый и подземный карбонатный и сульфатный карст. Среди поверхностных форм наиболее широко распространены воронки, достигающие иногда значительных размеров (до 30 м в диаметре и 10 м глубиной) и сложно построенные котловины. Встречаются суходолы, ниши и небольшие пещеры
3 — высокая	Юго-восточная часть плато, переход в низменную пологохолмистую равнину	Преимущественно открытый сульфатный карст. Поверхность сильно закарстована. Повсюду встречаются карстовые воронки до 50 м в диаметре и 15 м глубиной. При слиянии воронок образуются обширные котловины и рвы. Многочисленны молодые провалы. Многие небольшие реки и ручьи, попадая в закарстованную полосу, теряются в понорах и текут под землёй. Встречаются карстовые лога и пещеры

Материалы и методика работ

В работе (Торсуев, 1985) приведена картосхема с различной степенью закарстованности территории БКП (рис. 2а, см. с. 176). По степени интенсивности автор выделяет пять градаций: слабая, средняя, значительная, высокая и предельная закарстованность. Характеристика приведена в табл. 2.

Данная картосхема была обработана в программной среде ESRI ArcGIS, переведена в векторный формат (см. рис. 2б). Для дальнейшего исследования вышеперечисленные пять градаций были сгруппированы в три района с низким, средним и высоким уровнем закарстованности.

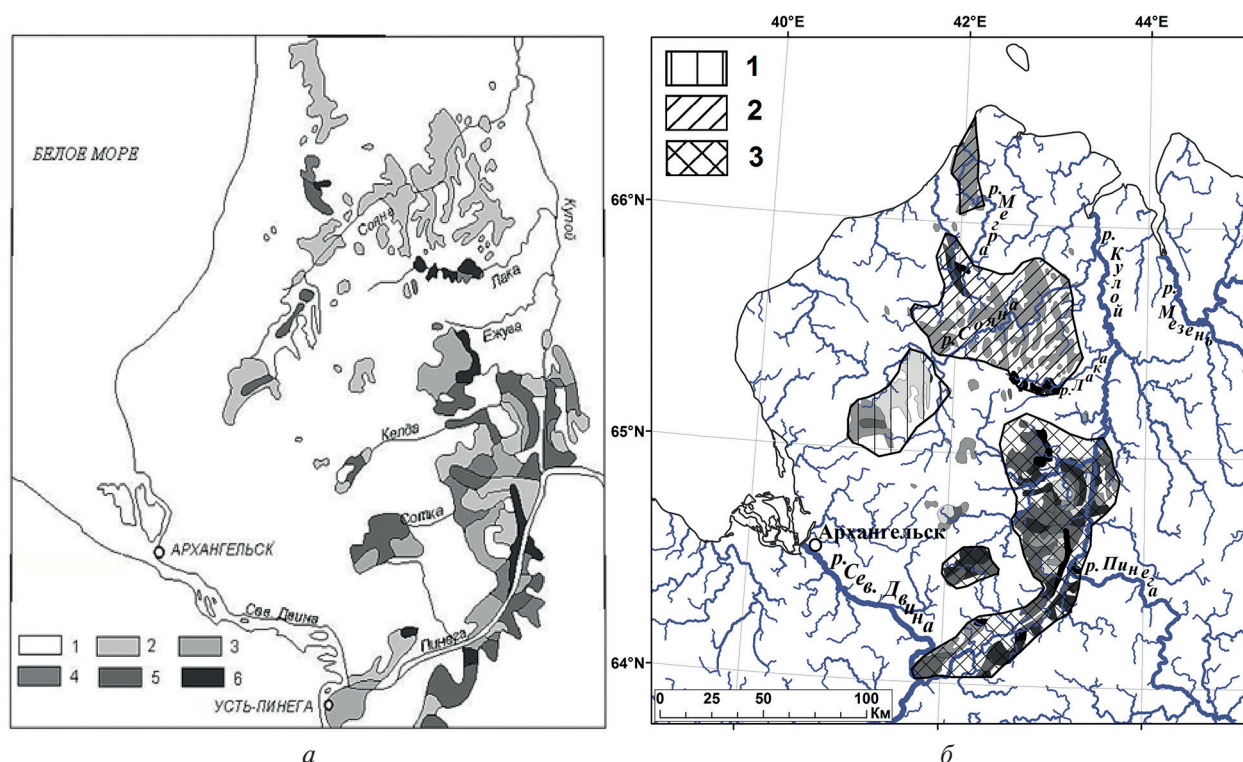


Рис. 2. Картограмма уровня закарстованности территории Беломорско-Кулойского плато: а — по публикации (Торсуев, 1985) (закарстованность: 1 — не выражена, 2 — слабая, 3 — средняя, 4 — значительная, 5 — высокая, 6 — предельная); б — авторская обработка (закарстованность: 1 — низкая, 2 — средняя, 3 — высокая)

Таблица 2. Степень закарстованности территории БКП, по публикации (Торсуев, 1985)

Градации	Описание
Слабая	Наличие единичных карстовых воронок на квадратный километр
Средняя	Наличие до десятка карстовых воронок на квадратный километр
Значительная	Наличие до 15–20 карстовых морфоскульптур на квадратный километр. Среди них преобладают воронки, но встречаются и котловины, карстовые озёра, карстово-эрозионные лога
Высокая	Широкое распространение большинства поверхностных карстовых форм плотностью до 80–100 на квадратный километр
Предельная	Практически полная поражённость рельефа карстом, плотность карстовых форм превышает несколько сот штук на квадратный километр

Для расчётов геоморфометрических параметров была построена цифровая модель рельефа (ЦМР) на основе глобальной ЦМР ASTER GDEM v.2 (Кутинов и др., 2019). По ЦМР рассчитаны такие параметры рельефа, как угол наклона (*англ.* Slope), индекс расчленённости рельефа TRI (*англ.* Terrain Ruggedness Index), индекс потенциала плоскостной эрозии (*англ.* Slope Length and Steepness factor — LS-factor), топографический индекс влажности TWI (*англ.* Topographic Wetness Index). Затем проведён кластерный анализ с применением модуля *K-Means Clustering for Grids* с разбиением параметров на три класса — минимальных, средних и максимальных значений. Далее найдены пересечения полигонов внутри каждого класса с помощью модуля *Intersect* по алгоритму (Vatti, 1992) в пределах полосы развития карстующихся пород на территории исследования. Кроме того, рассчитывалась плотность бессточных впадин и гидросети на ЦМР по авторским методикам, описанным в работах (Кутинов и др., 2024; Полякова и др., 2021; Mineev et al., 2023). Все операции производились в свободно распространяемой программной среде SAGA (*англ.* System for Automated Geoscientific Analyses) GIS.

Результаты работ и обсуждения

Основными факторами развития карстового процесса являются литологический состав и растворимость горных пород, гидрологические и гидрогеологические условия, химический состав поверхностных и подземных вод, мощность перекрывающих коренные породы четвертичных отложений и взаимосвязанные экзогенные денудационные процессы. Рельеф связан с карстовым процессом через свою геометрию, при этом геометрия рельефа, его формы на карстующихся территориях определяются карстом непосредственно. То есть при наличии карстующихся пород развитие карста должно отображаться в параметрах рельефа. Рассмотрим, какие геоморфометрические параметры рельефа имеют взаимосвязь с развитием карстового процесса.

Определяющим фактором возникновения любых экзогенных процессов выступает угол наклона поверхности. Интенсивность эрозии растёт экспоненциально с увеличением уклона. В работе (Руш, 2006) отмечается, что движение воды и растворённых в ней веществ по поверхности возможно при минимальном уклоне ($0,5\text{--}1,5^\circ$). Перемещение твёрдого осадочного материала начинается на поверхностях с углами наклона от $2\text{--}4^\circ$. Это склоны плоскостного и делювиального смыва. Гравитационные процессы начинают развиваться на склонах с уклоном свыше 15° (Полякова и др., 2024а).

На территории Двинско-Мезенской карстовой провинции преобладают плоские поверхности с углом наклона менее 2° (порядка 70 % территории). Преобладающее большинство значений расположено в диапазоне от 2 до 8° (29 %). И лишь 1 % территории приходится на площади с уклоном более 15° . Такие значения пространственно приурочены к границам поднятий, а на локальном уровне — к каньонообразным долинам рек, характерным для областей развития карстующихся карбонатных и карбонатно-сульфатных отложений карбона и перми.

Индекс расчленённости — это показатель разнородности рельефа. Чем выше значения данного параметра, тем более раздробленным становится рельеф. Математически параметр представляет собой среднее значение перепада высот между анализируемой ячейкой растра и восемью соседними. По сути, отражает степень дезинтеграции верхней части осадочного чехла территории.

С геоморфометрической точки зрения растворимость горных пород, гидрологические и гидрогеологические условия отражаются в таких параметрах, как LS-фактор и топографический индекс влажности.

LS-фактор выступает в качестве относительного показателя эрозии рельефа, учитывающего угол наклона поверхности и площадь водосборного бассейна (зоны дренирования). Считается индикатором способности водного потока вызывать эрозию (Гусев и др., 2018).

Топографический индекс влажности отображает перераспределение влаги в рельефе под действием силы тяжести, показывая тем самым потенциальную влажность водосбора. Относится к так называемым эффективным гидрологическим характеристикам водосборов (Гусев и др., 2018). Максимальные его значения приурочены к понижениям в рельефе и долинам рек, т.е. соответствуют наиболее увлажнённым местам, минимальные — к возвышенностям.

Для организации набора данных в наглядные структуры проводился кластерный анализ вышеперечисленных параметров с разбиением на три класса — минимальных, средних и максимальных значений (рис. 3, см. с. 178).

Из рис. 3 видно, что закарстованным территориям соответствуют классы средних и максимальных значений параметров. Однако такие же значения отмечаются и на участках, где карст не развит. Естественно некорректно говорить о том, что те или иные значения геоморфометрических параметров напрямую взаимосвязаны с карстом. Развитие карстового процесса определяется, прежде всего, наличием карстующихся пород, а также комплексом факторов, перечисленных выше. Тем не менее, для того чтобы выделить зоны с однотипными значениями геоморфометрических параметров в полосе развития карстующихся пород, была проведена операция объединения контуров классов, тем самым создавались объединённые полигоны максимальных, средних и минимальных кластерных значений угла наклона,

индекса расчленённости рельефа и LS-фактора (рис. 4). Эти параметры отображают геометрию рельефа, а также его предрасположенность к развитию экзогенных (эрозионных) процессов и карста в частности.

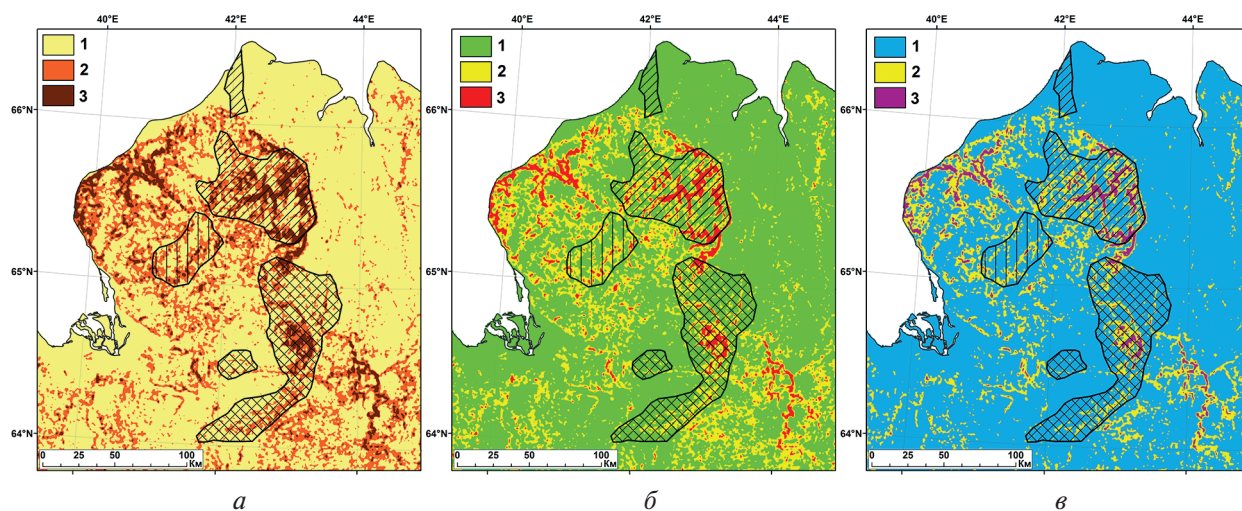


Рис. 3. Кластерные значения геоморфометрических параметров и закарстованность: а — угол наклона; б — индекс расчленённости; в — LS-фактор (кластерные значения: 1 — минимальные, 2 — средние, 3 — максимальные) (условные обозначения см. рис. 2б)

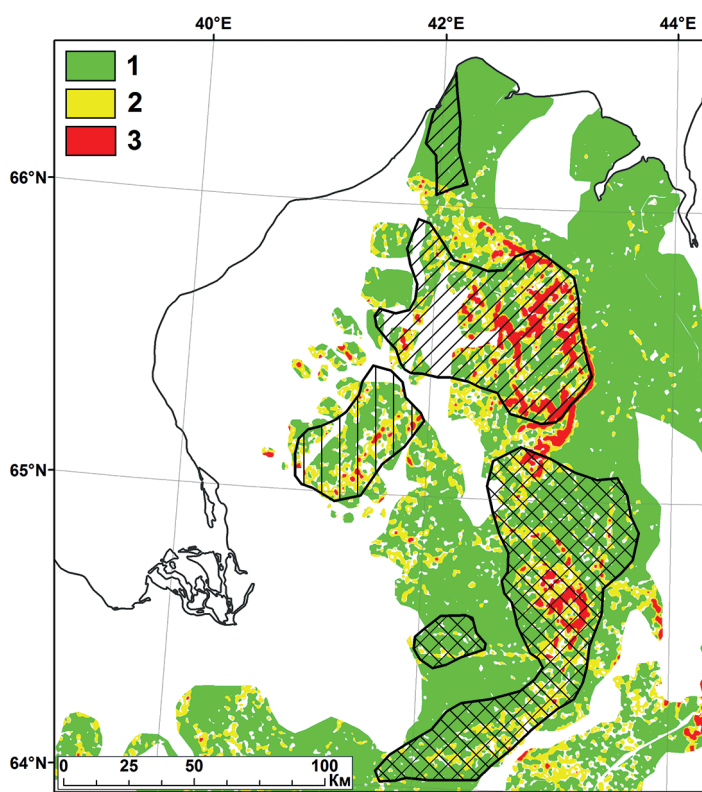


Рис. 4. Объединённые полигоны кластерных значений геоморфометрических параметров в полосе развития карстующихся пород: 1 — минимальные, 2 — средние, 3 — максимальные

Все вышеперечисленные параметры согласуются между собой и имеют прямую взаимосвязь с проявлением карстового процесса. Их максимальные значения в целом приурочены к границам возвышенностей рельефа, а на более детальном уровне — к долинам рек и отображают проявление карста на поверхности.

Мощным фактором, разрушающим и растворяющим горные породы, являются атмосферные осадки. Максимальное воздействие атмосферных осадков на горные породы проявляется там, где мощность перекрывающих четвертичных отложений минимальна.

На основе данных о рельефе коренных пород, взятых из работы (Асеев, 1974), построен растр топографической поверхности залегания коренных пород (ЦМР поверхности осадочного чехла). Разность между растрами дневного рельефа (рис. 5а) и рельефом коренных пород (см. рис. 5б) формирует растр мощности четвертичных отложений (см. рис. 5в), который согласуется с геологическими данными (см. рис. 5г).

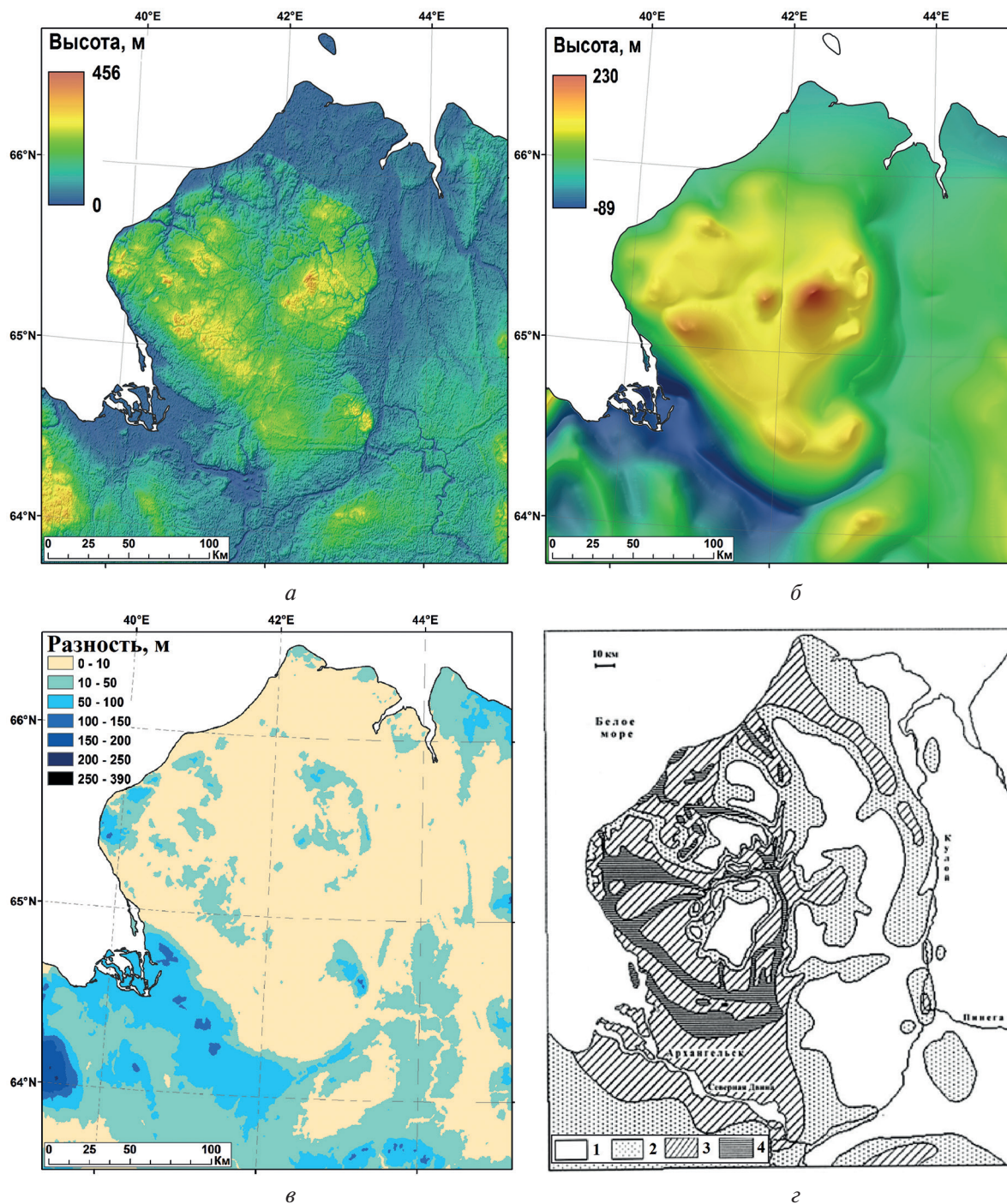


Рис. 5. Цифровые модели поверхности современного рельефа (а), рельефа коренных пород (б), разности между ними (в) (по работе (Полякова и др., 2024б)) и схема мощности четвертичных отложений БКП (г) (по публикации (Малов, 2003)) (площади с различной мощностью четвертичных отложений (в м): 1 — до 10, 2 — 10...20, 3 — 20...100, 4 — более 100)

На большей части БКП (в его центральной и восточной части) покров четвертичных отложений маломощен, как правило, менее 20 м, часто сокращается до первых метров или отсутствует полностью. Наиболее интенсивно карстовые процессы проявляются на склонах, местных водоразделах небольших рек, где покрывающие отложения частично или полностью размыты. Повышенная мощность чехла четвертичных отложений (до 150–250 м) приурочена к палеодолинам, а также к низинам (на западе — к приморским, не подверженным карстообразованию, на юге — к Пинежской низменности с максимальным развитием карста). Однако повышенная мощность четвертичного покрова в низинной части этой зоны не является ограничительным фактором для формирования карста, поскольку наличие карбонатных слоёв, обладающих большей плотностью по сравнению с сульфатными, а также фрагментов карбонатно-глинистой коры выветривания в кровле массивов позволяет процессу развиваться и на заболоченных участках. В геоморфометрическом плане это проявляется при расчётах плотности гидросети, бессточных впадин на ЦМР и подтверждается распределением болот по территории исследования (рис. 6).

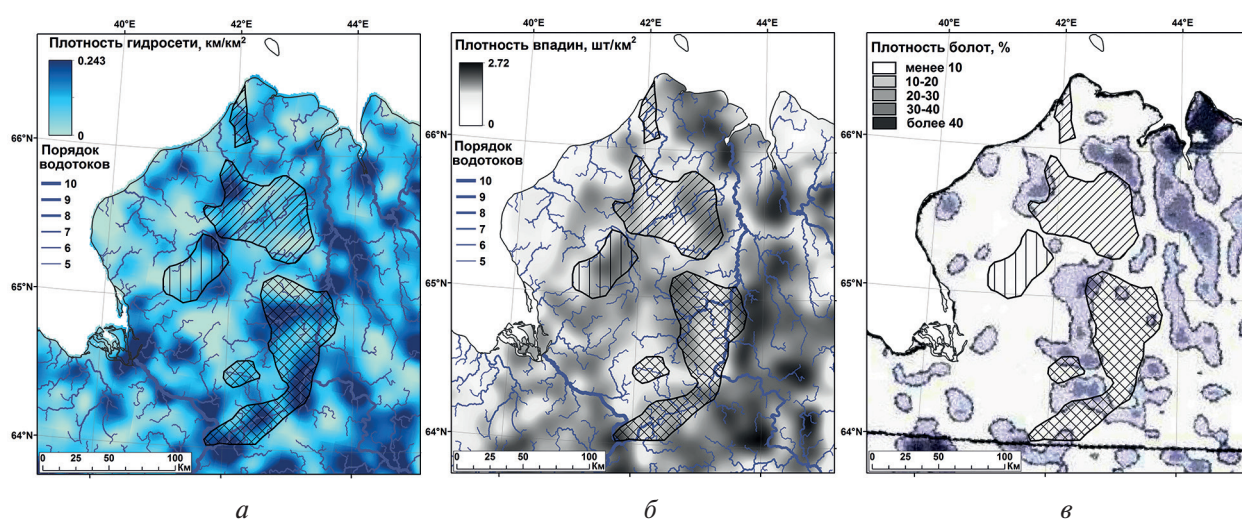


Рис. 6. Гидрологические параметры на территории исследования:
а — плотность гидросети; б — бессточные впадины; в — плотность болот

Алгоритм вычисления плотности гидросети приведён в авторских публикациях (Кутинов и др., 2024; Полякова и др., 2023; Mineev et al., 2023). Следует отметить, что в расчёт принимались водотоки пятого и высших порядков (максимальный порядок 10 соответствует реке Северной Двине), поскольку для данной территории низшие порядки (третий и четвёртый) имеют временные сезонные водотоки, а первый и второй соответствуют овражно-балочной сети.

Расчёт плотности бессточных впадин произведён по авторскому алгоритму, представленному в работе (Полякова и др., 2021). Здесь же сделан вывод о том, что повышенная плотность бессточных впадин приходится на территории с развитием карбонатного покрытого и погребённого карстового процесса, а наименьшие значения соответствуют открытым проявлениям сульфатного и карбонатного карста.

Кроме того, максимальное количество бессточных впадин в ЦМР приурочено к естественным понижениям в рельефе, к Кулойской и Пинежской низменностям, занятым болотами и застойными водами.

Таким образом, данные три показателя имеют обратную взаимосвязь с проявлением карстового процесса — чем ниже их значения, тем более ярко выражен процесс карстообразования и карстопроявления.

Выводы

Широкое распространение трещиноватых сульфатных и карбонатных пород, значительная расчленённость территории, небольшая мощность перекрывающих осадочный чехол четвертичных отложений и сильное переувлажнение поверхности при слабом испарении обуславливают интенсивное развитие в Двинско-Мезенской провинции поверхностного и глубинного карста. Наиболее энергично карстовые процессы развиваются в местах эрозионных врезов, где рыхлый материал почти полностью денудирован и карстующиеся породы выведены на дневную поверхность. Особенно благоприятны для карстообразования водораздельные и террасовые равнины с мощностью покрова до 4–5 м (Малков и др., 2001; Шаврина и др., 2007).

В геоморфометрическом плане развитие карстового процесса проявляется в высоких и средних значениях таких параметров рельефа, как угол наклона, индексы расчленённости рельефа и потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор). При совместном использовании математического (кластерного) и содержательного (предметного) анализа можно устанавливать пространственные взаимосвязи между характеристиками рельефа и степенью закарстованности территории.

Такие расчётные характеристики, как плотность гидросети, плотность бессточных впадин на ЦМР и плотность распределения болот по территории исследования, имеют обратную взаимосвязь с проявлением карстового процесса — чем ниже их значения, тем процесс выражен наиболее ярко.

Исследование проведено в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН № гос. регистрации № 125022502869-4.

Литература

1. Асеев А. А. Древние материковые оледенения Европы. М.: Наука, 1974. 318 с.
2. Гусев А. П., Федорский М. С., Шаврин И. А. Оценка техноморфогенеза с помощью ГИС SAGA // Материалы 4-й Международ. научно-практич. конф. «Трансграничное сотрудничество в области эколог. безопасности и охраны окружающей среды». Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2018. С. 432–435.
3. Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Полякова Е. В., Чистова З. Б. Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и её подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: Социосфера, 2019. 177 с.
4. Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б., Полякова Е. В. Расчет плотности гидросети равнинных арктических и субарктических территорий России по цифровой модели рельефа с использованием ГИС-технологий (на примере Архангельской области) // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14. № 4(56). С. 511–521. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-511-521.
5. Малков В. Н., Гуркало Е. И., Монахова Л. Б., Шаврина Е. В., Гуркало В. А., Франц Н. А. Карст и пещеры Пинежья. М.: Ассоциация «ЭкоСт», 2001. 208 с.
6. Малов А. И. Подземные воды Юго-Восточного Беломорья: формирование, роль в геологических процессах. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 234 с.
7. Опасные экзогенные процессы / под ред. В. И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
8. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л. и др. Применение глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v2 для выделения районов возможной активизации карстовых процессов на территории Архангельской области // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. Естественные науки. 2021. Т. 163. Кн. 2. С. 302–319. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
9. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Минеев А. Л. Геоморфометрический анализ рельефа в изучении карстового процесса // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2023. С. 342.
10. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. (2024а) Цифровое моделирование рельефа в изучении карстовых процессов на равнинных лесопокрываемых территориях // Материалы Всероссийской научно-практич. конф. с междунар. участием «Карст и пещеры. 2024». Пермь, 2024. С. 138–144.
11. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Минеев А. Л. (2024б) Геоэкологическая оценка водных объектов водосборного бассейна Белого моря на основе геоморфометрического анализа рельефа

- // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2024. № 1. С. 60–72. DOI: 10.31857/S0869780924010078.
12. Руш Е. А. Анализ методов геоэкологической оценки природно-техногенных систем // Экология промышленного производства. 2006. № 3. С. 2–8.
 13. Торсуев Н. П. Карст: пути географического изучения. Казань: Из-во Казанского ун-та, 1985. 156 с.
 14. Чикишев А. Г. Карст Русской равнины. М.: Наука, 1978. 192 с.
 15. Шаврина Е. В. Современное развитие подземного и поверхностного карста юго-востока Беломорско-Кулойского плато // Вопросы географии. 2018. № 147. С. 88–106.
 16. Шаврина Е. В., Малков В. Н., Гуркало Е. И. Особенности развития и распространения карста Архангельской области // Геоморфология. 2007. № 2. С. 90–101.
 17. Mineev A. L., Kutinov Yu. G., Polyakova E. V. et al. An algorithm for constructing a network of valleys using GIS and DEM: case study of Arkhangelsk oblast // Water Resources. 2023. V. 50. P. S358–S361. DOI: 10.1134/s0097807823700604.
 18. Vatti B. R. A generic solution to polygon clipping // Communications of the ACM. 1992. V. 35. No. 7. P. 56–63. DOI: 10.1145/129902.129906.

Geomorphometric features of karst process in plain forested territories (by the example of the Dvinsk-Mezen karst province)

E. V. Polyakova, Yu. G. Kutinov, A. L. Mineev, Z. B. Chistova

N. P. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS

Arkhangelsk 163020, Russia

E-mail: lenpo26@yandex.ru

The article presents the characteristics of the Dvinsk-Mezen karst province, determines the degree of karstification of carbonate and sulfate rocks. Based on the geomorphometric analysis of the digital elevation model, the parameters are calculated and geomorphometric features of the karst process are identified. When mathematical (cluster) and substantive (subject) analyses are used together, it is possible to establish spatial relationships between relief characteristics and the degree of karstification of the territory. It has been established that the development of the karst process is manifested in high and average values of such relief parameters as the Slope, Index of Terrain Ruggedness and LS factor. Their maximum values are generally confined to the boundaries of relief elevations, and at a more detailed level to river valleys and reflect the manifestation of karst at the surface. Such calculated characteristics as the density of the channel network, the density of sinks in the digital elevation model and the density of distribution of swamps in the study area have an inverse relationship with the manifestation of the karst process — the lower their values, the more pronounced the process of karst formation and karst manifestation in the study area.

Keywords: Dvinsk-Mezen karst province, Belomorsko-Kuloiskoye plateau, digital elevation model, geomorphometric parameters, karst

Accepted: 04.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-173-183

References

1. Aseev A. A., *Drevnie materikovyie oledeneniya Evropy* (Ancient continental glaciations of Europe), Moscow: Nauka, 1974, 318 p. (in Russian).
2. Gusev A. P., Fedorskii M. S., Shavrin I. A., Technogenic transformations of a relief and its landscape-ecological consequences, *Materialy 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Transgranichnoe sotrudnichestvo v oblasti ehkologicheskoi bezopasnosti i okhrany okruzhayushchei sredy"* (Proc. 4th Intern. Scientific and Practical Conf. "Cross-Border Cooperation in the Field of Environmental Safety and Environmental Protection"), Gomel': GGU im. F. Skoriny, 2018, pp. 432–435 (in Russian).

3. Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Polyakova E. V., Chistova Z. B., *Vybor bazovoi tsifrovoy modeli rel'efa (TsMR) ravninnykh territorii Severa Evrazii i ee podgotovka dlya geologicheskogo raionirovaniya (na primere Arkhangel'skoi oblasti)* (The choice of the basic digital elevation model (DEM) of the plain territories of the North of Eurasia and its preparation for geological zoning (on the example of the Arkhangelsk region)), Penza: Sotsiosfera, 2019, 177 p. (in Russian).
4. Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Polyakova E. V., Density calculation of the hydro-network of the arctic and subarctic plain territories of the Russian Federation based on a digital elevation model using GIS technologies (case study of the Arkhangelsk Region), *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, V. 14, No. 4(56), pp. 511–521 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-511-521.
5. Malkov V. N., Gurkalo E. I., Monakhova L. B., Shavrina E. V., Gurkalo V. A., Frants N. A., *Karst i peshchery Pinezh'ya* (Karst and caves of Pinezhya), Moscow: Assotsiatsiya "Ekost", 2001, 208 p. (in Russian).
6. Malov A. I., *Podzemnye vody Yugo-Vostochnogo Belomor'ya: formirovanie, rol' v geologicheskikh protsessakh* (Groundwater of the South-Eastern White Sea: formation, role in geological processes), Ekaterinburg: UrO RAN, 2003, 234 p. (in Russian).
7. *Opasnye ekzogennye protsessy* (Dangerous exogenous processes), V. I. Osipov (ed.), Moscow: GEOS, 1999, 290 p. (in Russian).
8. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L. et al., Using the ASTER GDEM v.2 global digital elevation model to identify areas of possible activation of karst processes in the Arkhangelsk region (Russia), *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki*, 2021, V. 163, No. 2, pp. 302–319 (in Russian), DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
9. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Mineev A. L., Geomorphometric analysis of relief in the study of the karst process, *Materialy 21-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 21th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2023, p. 342 (in Russian).
10. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B. (2024a), Digital elevation modeling in the study of karst processes in plain forested areas, *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Karst i peshchery. 2024"* (Proc. Scientific and Practical Conf. with Intern. Participation "Karst and Caves. 2024"), Perm', 2024, pp. 138–144 (in Russian).
11. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Mineev A. L. (2024b), Geocological assessment of water bodies in the drainage basin of the White Sea based on geomorphometric analysis of the relief, *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2024, No. 1, pp. 60–72 (in Russian), DOI: 10.31857/S0869780924010078.
12. Rush E. A., Analysis of methods of geocological assessment of natural and man-made systems, *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*, 2006, No. 3, pp. 2–8 (in Russian).
13. Torsuev N. P., *Karst: puti geograficheskogo izucheniya* (Karst: Paths of geographical study), Kazan': Izd. Kazanskogo universiteta, 1985, 156 p. (in Russian).
14. Chikishev A. G., *Karst Russkoi ravniny* (Karst of the Russian Plain), Moscow: Nauka, 1978, 192 p. (in Russian).
15. Shavrina E. V., Present-day development of surface and subterranean karst in the south-east of the Belomor-Kuloi Plateau, *Voprosy geografii*, 2018, No. 147, pp. 88–106 (in Russian).
16. Shavrina E. V., Malkov V. N., Gurkalo E. I., Karst development and distribution in the Arkhangelsk region, *Geomorfologiya*, 2007, No. 2, pp. 90–101 (in Russian).
17. Mineev A. L., Kutinov Yu. G., Polyakova E. V. et al., An algorithm for constructing a network of valleys using GIS and DEM: case study of Arkhangelsk oblast, *Water Resources*, 2023, V. 50, pp. S358–S361, DOI: 10.1134/s0097807823700604.
18. Vatti B. R., A generic solution to polygon clipping, *Communications of the ACM*, 1992, V. 35, No. 7, pp. 56–63, DOI: 10.1145/129902.129906.