

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 551.4.04

doi: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ASTER GDEM v.2 ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ РАЙОНОВ ВОЗМОЖНОЙ АКТИВИЗАЦИИ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

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

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, г. Архангельск, 163000, Россия*

Аннотация

В работе показана возможность применения метода обнаружения бессточных впадин, используемого при гидрологической коррекции цифровой модели рельефа для выявления областей вероятного проявления карстового процесса на территории Архангельской обл. Данный подход особенно актуален для лесопокрытых северных территорий с возрастающей антропогенной нагрузкой. Ошибки (впадины), устраняемые процедурой гидрологической коррекции, не всегда являются ложными. Они могут быть естественными элементами рельефа, особенно в карстовых областях. Проведена гидрологическая коррекция цифровой модели рельефа Архангельской обл. (на основе ASTER GDEM v.2), получен векторный слой впадин, рассчитана плотность бессточных впадин на единицу площади. Построенная карта плотности бессточных впадин сопоставлялась с распространением карстующихся пород на территории Архангельской обл. Установлено, что участки максимального развития открытого карста соответствуют невысокой плотности бессточных впадин. Наибольшая плотность бессточных впадин приходится на территории с развитием карбонатного покрытого и погребенного карста.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, гидрологическая коррекция, бессточная впадина, карст

Введение

Карст является одним из наиболее опасных и трудно прогнозируемых геологических процессов на Земле. Карстовые просадки, деформации и провалы создают геоэкологическую напряженность территории, поскольку представляют собой «открытые» окна для поступления загрязняющих веществ в неустойчивую к внешнему воздействию геологическую среду [1]. Кроме того, активизация карстовых процессов значительно усложняет процесс строительства и эксплуатации зданий, прокладку и содержание дорожного покрытия, использование сельскохозяйственных земель и прочее, что наносит значительный ущерб хозяйству и населению. С другой стороны, сама хозяйственная деятельность приводит к активизации природных процессов или развитию новых опасных явлений, которые ранее либо отсутствовали, либо не проявлялись на нетронутых территориях [2]. Изменения среднегодовых температур, особенно ярко проявляющиеся в северных

регионах, также зачастую могут являться первопричиной развития различных экзогенных процессов [3]. Известно, что Архангельская обл. относится к карстовым регионам страны. Спрогнозировать вероятность активизации карстового процесса весьма затруднительно, поскольку на начальных этапах процесс протекает под землей и только позднее проявляется на дневной поверхности. Тем не менее проявления экзогенной геодинамики, наблюдаемые на территории Архангельской обл. и сопутствующие развитию карстового процесса, служат индикаторами современной активности карста [4]. Так, например, в сентябре 2020 г. в Виноградовском р-не Архангельской обл. образовалась карстовая воронка диаметром 13 м и глубиной 24 м (URL: <https://29.ru/text/incidents/69488615/>). За неделю до этого события жители д. Кузомень Холмогорского р-на Архангельской обл. отмечали появления ям диаметром 1–2 м и глубиной 3–4 м за огородами напротив деревни, прямо рядом с тропинками, по которым ходят люди и скот (URL: <https://29.ru/text/incidents/69480887/>). В этой связи изучение, мониторинг и, главное, выявление площадей с возможным проявлением карстового процесса является важной и актуальной задачей. Вместе с тем труднодоступность северных территорий из-за отсутствия дорог и развитой инфраструктуры создает большие сложности при изучении карстовых процессов обычными натурными способами. Малая эффективность аэро- и космосъемки обусловлена наличием лесного покрова. Цифровое моделирование рельефа как один из продуктов космической деятельности в данном случае делает возможным проведение объективной дистанционной оценки обширных территорий одновременно с использованием геоморфометрического аппарата и логических процедур [5].

Цель настоящей работы – показать применимость метода обнаружения бессточных впадин, используемого при гидрологической коррекции цифровой модели рельефа территории Архангельской обл. для выявления площадей возможного проявления карстовых процессов.

Обычно для выделения карстовых объектов используются материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения (например, WorldView-1, 2, ALOS/PRISM и т. п.) с дальнейшей наземной верификацией выделенных объектов. Наземным методам изучения карста посвящены многочисленные методические пособия и инструктивные документы.

В зарубежных источниках более двух десятилетий публикуются работы по выявлению впадин в цифровых моделях рельефа, по разработке методик их автоматического устранения, а также по разделению впадин на ошибочные и те, которые представляют собой естественные элементы в рельефе. Однако исследования по выделению карста с использованием бессточных впадин практически отсутствуют либо проводятся для открытых, не покрытых лесом поверхностей [6]. В российских работах авторы традиционно придерживаются мнения, что впадины – это ошибки в моделях. Так, например, в работе [7] отмечается, что «значительное количество замкнутых понижений обнаружено в пределах русел водотоков, что связано, очевидно, с внутренними ошибками данных ЦМР».

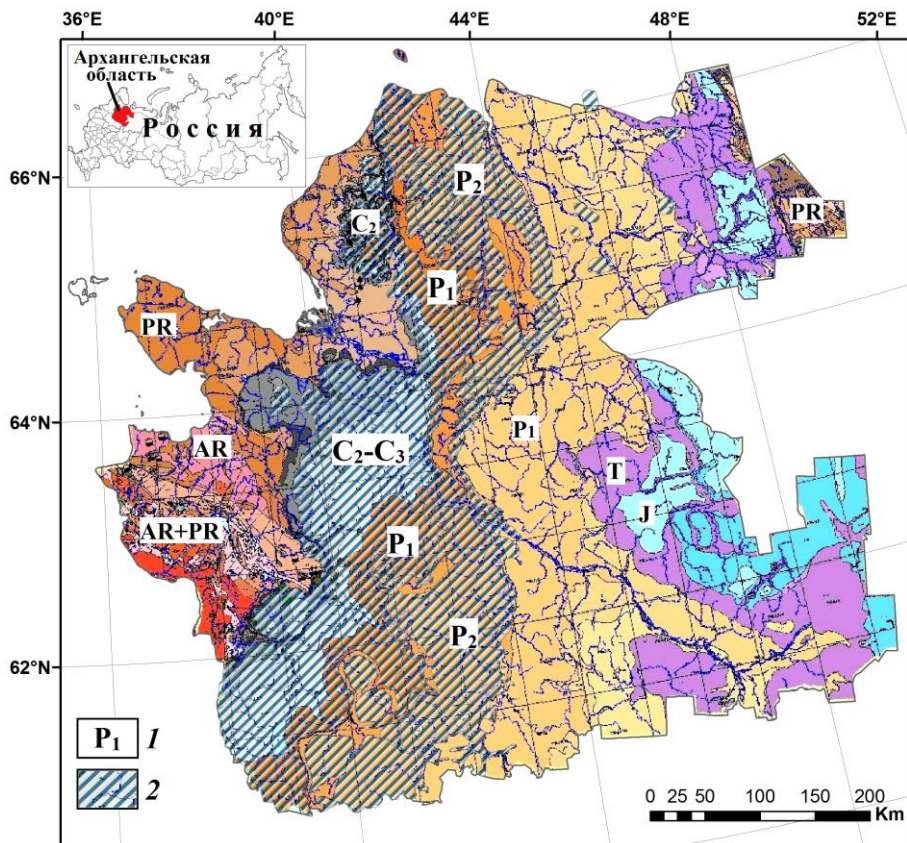


Рис. 1. Распространение карстующихся пород на территории Архангельской обл.: 1 – полоса развития карстующихся пород, 2 – геологический возраст пород: AR – архейские, AR-PR – архей-протерозойские, PR – протерозойские, C₂ – средне-каменноугольные, C₂-C₃ – средне-верхне-каменноугольные, P₁ – нижнепермские, P₂ – верхнепермские, T – триасовые, J – юрские

1. Геологическая характеристика района исследования

Территория Архангельской обл. характеризуется благоприятными условиями для развития карстового процесса. Здесь широко развиты карстующиеся палеозойские карбонатные и сульфатные породы, выходящие на поверхность или покрытые четвертичными отложениями. Отличительной особенностью исследуемой территории является ее тектоническая неоднородность, что нетипично для платформенных условий. Сочетание геологических условий и особенностей естественно-исторического развития территории привело к формированию уникального комплекса карстовых форм, отличающегося максимальной плотностью подземных и поверхностных образований и разнообразием карстовых гидрологических явлений. Развитие карстового процесса в современных условиях происходит преимущественно в пределах локальных зон крупных эрозионных врезов и блоковых тектонических поднятий [8]. Растворимыми породами являются известняки и доломиты среднего (C₂), верхнего (C₃) карбона и нижнепермского (P₁) возрастов, а также известняки, доломиты, гипсы и ангидриты верхнепермского (P₂) возраста. Они образуют широкую полосу карстующихся пород

субмеридионального простираения, пересекающую область от побережья Белого моря до южной ее границы (рис. 1). Протяженность данной полосы около 600 км, а ширина составляет 100–200 км. Суммарная площадь карстующихся пород – 100.1 тыс. км², что составляет 32.4% от материковой площади Архангельской обл. [9].

Сульфатный карст занимает на территории Архангельской обл. значительно меньшие площади, чем карбонатный, но проявляется более динамично, разнообразно и сосредоточенно [4, 8]. Наибольшей активностью в современных условиях характеризуются карстовые процессы юго-восточной части Беломорско-Кулойского плато. В долине р. Сотки отмечается максимальное проявление открытого карста [4].

2. Материалы и методика

Построение цифровой модели рельефа (ЦМР) из космоса базируется на «классических» стереофотограмметрических методах создания картографической продукции, используются цифровые методы стерео визуализации пар космических снимков. Особенности ЦМР из космоса являются низкая стоимость (ряд ЦМР находятся в открытом доступе), широкий охват территории, высокая плотность и однородность данных. Все это позволяет анализировать большие территории с одинаковым качеством исходного материала. Несмотря на значительное внешнее сходство, ЦМР, построенные по топографическим картам и данным ДЗЗ, являются различными продуктами цифровых технологий. ЦМР из космоса характеризуются «пиксельной» структурой, высокой плотностью и однородностью данных, минимальным применением процедуры интерполяции данных [10]. В целом ЦМР из космоса являются одним из продуктов ДЗЗ, где вместо спектральных образов применяются матрицы числовых значений высот рельефа, а для тематической обработки данных используются геоморфометрические методы.

На территорию Архангельской обл. ранее нами была построена ЦМР на основе ASTER GDEM v.2 в программной среде SAGA GIS. Подробно методика построения модели изложена в работах [11–13]. Расчеты релевантности (точности, надежности) модели приведены в [14].

Часто цифровые модели рельефа в их необработанном виде содержат множественные ошибки, ложные значения, артефакты. Ошибки ЦМР подразделяются на «приемники» (понижения, «ямы», отрицательные выбросы) и пики (возвышенности, положительные выбросы). Приемник – это ячейка или группа ячеек, окруженная большими значениями высоты, он также называется «локальное понижение», или «впадина» [15]. Впадиной называют локальный минимум, не имеющий стока вниз по склону ни к одной из смежных ячеек ЦМР. Впадина может состоять из одной или из группы смежных ячеек с одинаковым значением высоты, которое меньше значения окружающих ячеек. В качестве впадин могут выступать как элементы естественного рельефа, так и ложные артефакты. Ложные впадины – это недостоверные значения ЦМР, их наличие обусловлено ошибками входных данных, ошибками интерполяции в процессе генерации цифровой модели, округления интерполированных значений, усреднения значений высоты [16]. Гидрологическая коррекция является важной и обязательной процедурой для проведения дальнейшего гидрологического анализа на основе ЦМР.

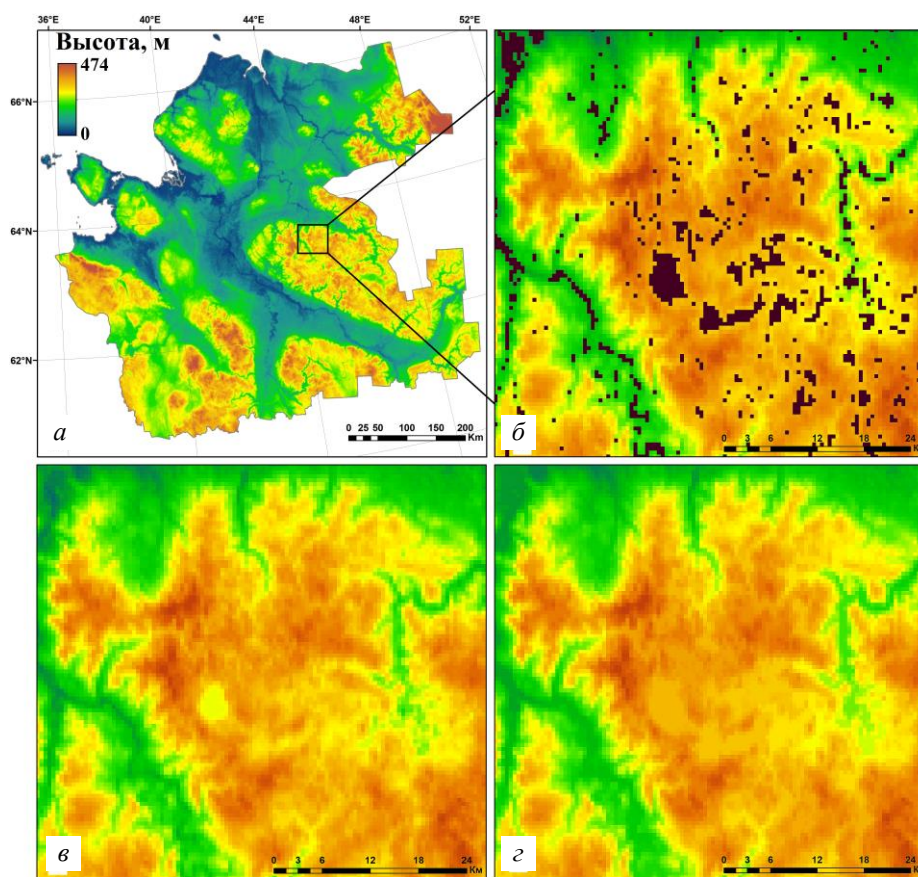


Рис. 2. Пример работы метода Л. Ван и Х. Лю [16] на реальной поверхности: *a* – исходная ЦМР Архангельской обл., *б* – фрагмент рельефа с «маской» впадин (фиолетовый цвет), *в* – фрагмент рельефа с впадинами до коррекции, *г* – фрагмент рельефа с заполненными впадинами после коррекции

Существует достаточное количество автоматических методов устранения ложных впадин из ЦМР [17–24]. Одни методы основаны на простом последовательном увеличении значений высоты в ячейках впадины до тех пор, пока не станет возможным сток вниз по склону с тем ограничением, что сток не может вернуться обратно в ячейку впадины. Другие методы предлагают простое размытие значений цифровой модели рельефа для уменьшения количества и размера впадин [25]. Для заполнения впадин в ЦМР Архангельской обл. был использован метод Л. Ван и Х. Лю [16], обладающий наибольшей вычислительной эффективностью по сравнению с другими (рис. 2).

После проведения гидрологической коррекции из растра ЦМР Архангельской обл. с заполненными впадинами вычитался исходный растр. В результате получен растр маски глубины заполнения впадин. Далее с использованием модуля *SAGA GIS Vectorising Grid Classes* маска впадин переводилась в векторный формат, из нее вычитались известные крупные водоемы, речные разливы и прочие водные объекты с использованием данных *Open street map* (рис. 3). Важность процедуры вычитания показана в статье [26]. Тем самым отсекаются априорно известные водные накопители, которые не являются ложными впадинами.

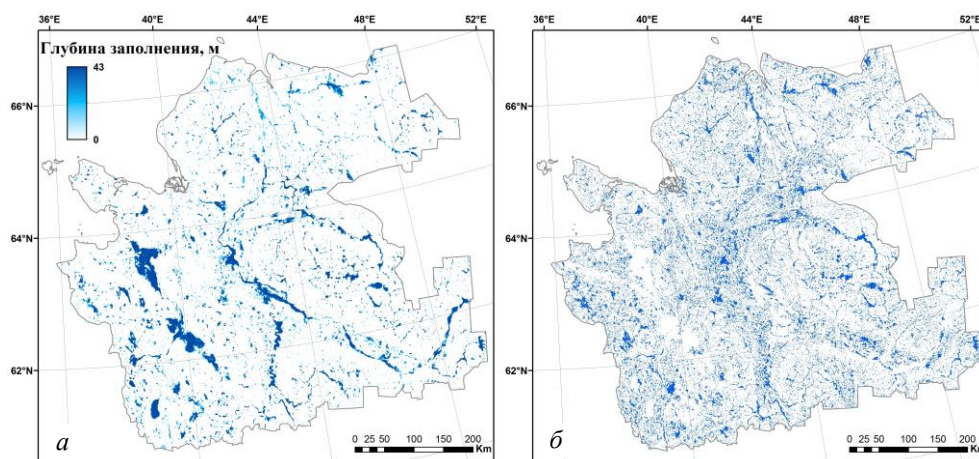


Рис. 3. Глубина заполнения впадин, м (а) и векторизованная маска впадин с удаленными крупными водоемами (б)

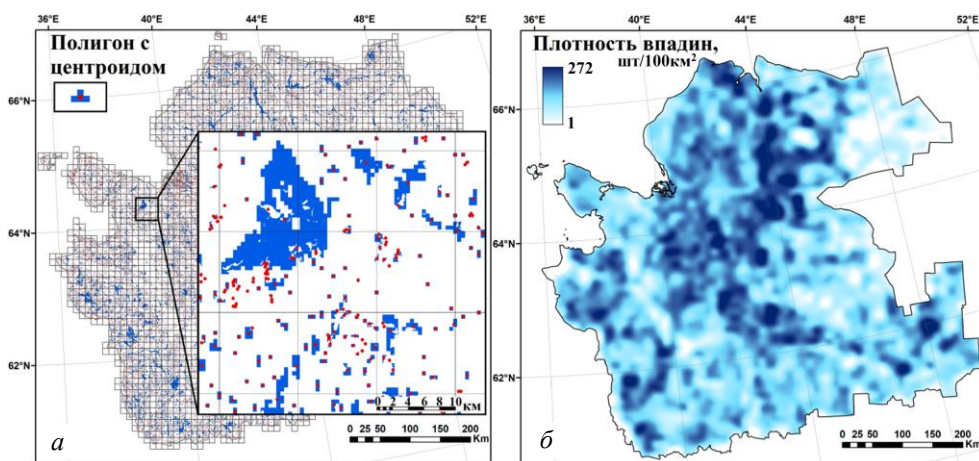


Рис. 4. Разбивка территории области на квадраты 10 км × 10 км для подсчета центров (а) и плотность бессточных впадин, шт./100 км² (б)

Для полигонов векторной маски впадин были построены центроиды. Центроидом является центральная точка полигона. Для подсчета количества точечных объектов вся исследуемая территория разбивалась на квадраты 10 км × 10 км. Далее проводилась интерполяция методом *B-spline* в SAGA GIS с применением модуля *Resampling*. В результате получена карта плотности бессточных впадин на единицу площади (рис. 4).

3. Результаты и их обсуждение

Прежде всего для корректного проведения исследования необходимо было определить понятие о топологии впадин. Не все впадины являются ошибочными (ложными) в ЦМР. Некоторые из них могут иметь естественное происхождение, особенно в карстовых областях, к которым относится Архангельская обл. В работе [27] приведена следующая схема топологии впадин на ЦМР (рис. 5).

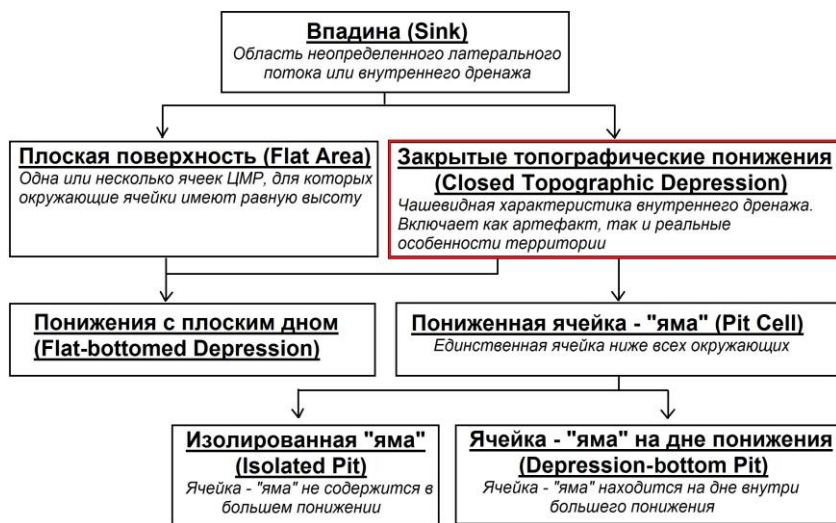


Рис. 5. Топология впадин на ЦМР, по [27], перевод наш

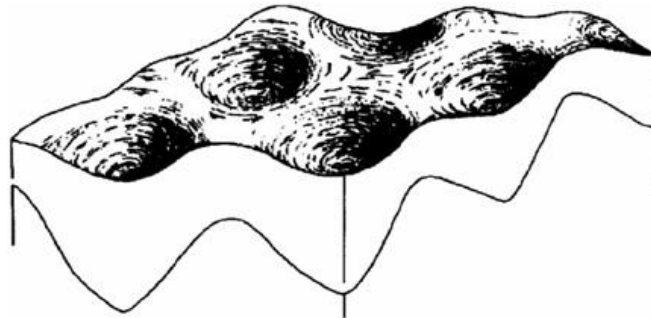


Рис. 6. Топографическая поверхность карстовых воронок, по [31]

Дж.Б. Линдси [27] отмечает, что «в категории “закрытые топографические понижения” следует выделять естественные элементы рельефа». В работах ряда других авторов [17, 28–30] также показана реальность большинства впадин (то есть их соответствие естественным понижениям в рельефе, а не ошибочным значениям в ЦМР) для равнинных территорий.

По сути, топографическая поверхность воронок [31] – это поверхность бессточных впадин (рис. 6). Однако, учитывая пространственное разрешение ЦМР ASTER GDEM v.2 (1 угл. сек., ~30 м), выделение отдельных локальных карстовых впадин не представляется возможным. Но оценку предрасположенности районов к развитию карстовых процессов по плотности бессточных впадин можно провести. Повышенная плотность бессточных впадин позволяет предположить активизацию тектонических процессов и, как следствие, повышенную дифференциацию коренных пород. Таким образом, выделяется не конкретная карстовая впадина, а районы с максимальным развитием локальных форм отрицательного рельефа.

Выделение конкретных впадин на настоящий момент возможно по глобальной ЦМР ArcticDem (разрешение – 2 м, точность по высоте ~ 2 м, согласно URL: <https://www.pgc.umn.edu/guides/arcticdem/introduction-to-arcticdem/>). Харак-

теристика этой модели приведена авторами в работе [32]. В настоящей статье она не рассматривается.

Общее количество ячеек в используемой ЦМР составляет 344 650 349, из них заполнено – 130 705 668, что соответствует 38% территории. Область карстующихся пород на территории области составляет 32.4%. В целом значения глубин впадин варьируют от 1 до 21 м, доминирующей является глубина 1 м (45%), глубины 1–5 м занимают 81% от всей выборки. Наиболее глубокие впадины пространственно совпадают с поймами крупных рек и обусловлены, скорее всего, наличием стариц, а не артефактами, во всяком случае частично.

Верификация полученной модели проводилась: на площади развития открытого карста на территории Государственного Пинежского заповедника [33]; для покрытого карста на площади Холмогорского р-на Архангельской обл. Поскольку исходное разрешение ЦМР составляет около 30 м, выбирались небольшие воронки, от 20 до 50 м в диаметре. Такие понижения наиболее соответствуют техническому понятию «ошибки» модели. Нашей же целью было установить, что это не ошибки модели, а реально существующие элементы карстового рельефа или проявлений современных тектонических процессов на локальном уровне.

«Сухие» бессточные впадины, в сущности, являются каналами, связывающими формы современного рельефа с более глубокими горизонтами разреза, и могут быть путями глубинной дегазации, оказывающей воздействие на состояние компонентов природной среды, в первую очередь на растительный покров. Поэтому кроме верификации бессточных впадин нами проводились на их площади замеры плотности радона в грунтах, содержания кислорода, углекислого газа, метана, углеводородов с целью определения наличия глубинной дегазации, так как максимальная плотность бессточных впадин пространственно совпадает с тектоническими узлами. Измерения проводились полевым газоанализатором ECOPEX-5 (RS DYNFMICS, Чешская республика) и радиометром радона и торона Альфарад плюс РП с пробоотборным устройством и автономной воздуходувкой АВ-07 (ООО «НТМ-Защита», Россия). Возможно, изменение характера растительности на площади впадин связано не только с карстом, но и с глубинной дегазацией тектонической структуры. Полученные результаты измерений находятся в процессе обработки, но предварительные результаты говорят о наличии связи бессточных впадин с глубинной дегазацией.

Пространственное совмещение карт плотности бессточных впадин и распространения карстующихся пород проиллюстрировано на рис. 7. В целом субмеридиональная зона повышенной плотности бессточных впадин совпадает с выходом пород, предрасположенных к развитию карстовых процессов. На более детальном уровне там же выделяются две зоны, отличающиеся значениями плотности бессточных впадин (рис. 8).

Зона I – правобережье р. Северной Двины, территория Двинско-Мезенской карстовой провинции. В этой зоне отмечается большее по сравнению с остальной частью области проявление открытого карста. Развитие карстового процесса здесь происходит преимущественно в пределах локальных зон крупных эрозионных врезов и блоковых тектонических поднятий и обеспечивается распространением трещиноватых сульфатных и карбонатных пород, значительной расчлененностью рельефа, небольшой мощностью четвертичных отложений и сильным

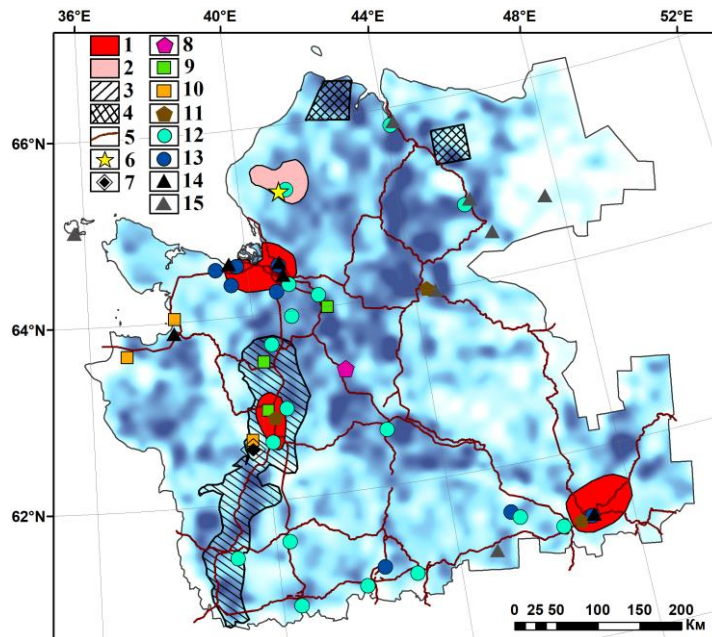


Рис. 7. Взаимосвязь источников антропогенного воздействия с плотностью бессточных впадин: 1 – зоны интенсивного промышленного воздействия; 2 – горнодобывающие зоны; 3 – зона воздействия космодрома; 4 – зоны сброса отработанных ступеней ракет; 5 – дороги общего и федерального пользования; 6–13 – месторождения: 6 – алмазов; 7 – бокситов; 8 – гипсов; 9 – известняков; 10 – строительных камней; 11 – глин; 12 – пресных подземных вод; 13 – минеральных подземных вод; 14 – ТЭЦ; 15 – крупные дизельные электростанции

переувлажнением поверхности [34]. Участки максимального развития открытого карста (долина р. Сотки в Пинежском заповеднике) соответствуют невысокой плотности бессточных впадин, т.к. здесь происходит непосредственное поглощение атмосферных (дождевых и снеговых) осадков обнаженной карстовой поверхностью. Просачиваясь вглубь массивов, атмосферные и поверхностные воды концентрируются в трещинных зонах, формируя подземные водотоки, речные сети и водосборы. Поверхность таких ландшафтов испещрена поглощающими трещинами, здесь практически отсутствуют стоячие воды и болота [35].

Так, для территорий развития открытого карста резко сокращается площадь болот – от общей плотности болот по области в 35–40% до 3–5%. На площадях развития карста отмечается смена темнохвойных еловых лесов светлохвойными сосновым и лиственными [36]. Увеличиваются запасы древесины на единицу площади (до 250–300 м³ в сравнении с 100–150 м³ на незакарстованных территориях). Кроме того, отмечается проникновение лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), вида, более характерного для Урала и Сибири, по «карстовым коридорам» и «карстовым островам» далеко на запад [37].

Таким образом, зона I с относительно пониженной плотностью бессточных впадин территориально совпадает с площадями открытого карста («зрелая» стадия). Это можно объяснить процессом объединения локальных изолированных впадин в протяженные вытянутые зоны, формирующиеся в процессе выщелачивания крупных эрозионных врезов. Такие особенности развития карстового процесса

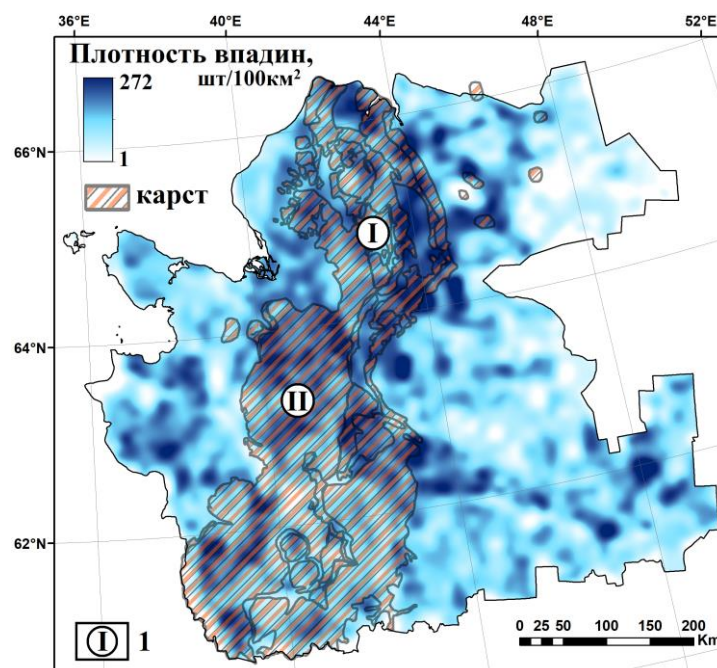


Рис. 8. Плотность бессточных впадин и распространение карстующихся пород на территории Архангельской обл.: 1 – зоны, отличающиеся по плотности бессточных впадин: I – правобережье, II – левобережье р. Северной Двины

находят отражение в повышенных значениях индекса расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index) и плотности потоков [10].

Зона II – левобережье р. Северной Двины, территория Онего-Двинской карстовой провинции. Для этой зоны отмечается в большей степени развитие покрытого карста. Карстующиеся породы покрыты чехлом осадочных отложений и подвергаются воздействию главным образом подземных вод, вмещающего их водоносного горизонта. Это территория, где заболоченные низины чередуются с платообразными или холмисто-волнистыми равнинами, она находится в условиях избыточного увлажнения. Карстующиеся нижнепермские и каменноугольные породы весьма водообильны. Подземные воды залегают на небольшой глубине (2–60 м) [35].

Здесь отмечается максимальная плотность болот, поскольку по территории карстования повсеместно развитие замкнутых депрессий в виде карстовых воронок и понижений в рельефе. Процесс карстования пород пока не достиг «зрелого» возраста, то есть вертикальное дренирование поверхностных вод развито слабо. Для этой зоны характерно развитие погребенного карста. В то же время образование карстовых воронок в Виноградовском и Холмогорском р-нах Архангельской обл. свидетельствует о начинающейся активизации карстовых процессов. С точки зрения возможности проявления карстовых процессов, данная зона представляет большую опасность, по сравнению с первой зоной, поскольку именно здесь располагаются основные источники антропогенного воздействия на природную среду [35]. Объекты техногенного воздействия вынесены на карту (рис. 7), согласно проекту «Схема территориального планирования Архангельской

области» (Постановление Правительства Архангельской области от 25 декабря 2012 г. № 608-пп «Об утверждении схемы территориального планирования Архангельской области»), разработанному Российским научно-исследовательским и проектным институтом Урбанистики (РосНИПИУрбанистики) по заданию администрации Архангельской обл. (URL: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minstroy/shemes/>).

Кроме того, в работе [38] установлено локальное загрязнение грунтов и грунтовых вод нефтепродуктами на ряде объектов хранения, переработки, транспортировки нефти и нефтепродуктов на территории Архангельской обл. Пространственное совпадение источников антропогенного воздействия положительно коррелирует с максимальной плотностью бессточных впадин, что крайне негативно сказывается на экологическом состоянии территории области [39, 40].

Заключение

Таким образом, метод обнаружения бессточных впадин, используемый при гидрологической коррекции цифровой модели рельефа с целью устранения ошибок, может быть применен для качественной оценки возможного проявления карстового процесса, что особенно актуально для лесопокрытых северных территорий с возрастающей антропогенной нагрузкой. Максимальная плотность бессточных впадин приходится на территории с развитием карбонатного покрытого и погребенного карста. В этой же зоне располагаются основные источники антропогенного воздействия на природную среду Архангельской обл., что формирует ее высокую экологическую напряженность. Выявленные на основе метода анализа плотности бессточных впадин особенности территории необходимо учитывать при планировании и хозяйственном освоении территории, строительстве дорог, развитии инфраструктуры, разработке месторождений, вырубке лесов и проведении лесопромышленных мероприятий, а также при любой другой хозяйственной деятельности.

Благодарности. Работа выполнена в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА РАН, № гос. регистрации АААА-А18-118012390305-7, а также при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60024).

Литература

1. Кошелева Т.М. Проблема использования карстовых ландшафтов при размещении полигонов твердых бытовых отходов в Нижегородской области // Изв. Сам. науч. центра РАН. – 2009. – Т. 11, № 1. – С. 219–222.
2. Опасные экзогенные процессы / Под ред. В.И. Осипова. – М.: ГЕОС, 1999. – 290 с.
3. Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б. Цифровое моделирование рельефа в оценке вероятности развития эрозионных процессов в северных регионах страны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 1. – С. 95–104. – doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104.
4. Шаврина Е.В. Современное развитие подземного и поверхностного карста юго-востока Беломорско-Кулойского плато // Вопр. географии. – 2018. – № 147. – С. 88–106.
5. Полякова Е.В. Геоморфометрический подход в геоэкологических исследованиях северных территорий страны // Усп. соврем. естествознания. – 2018. – № 3. – С. 117–122. – doi: 10.17513/use.36712.

6. *Carvalho Júnior O.A de., Guimarães R.F., Montgomery D.R., Gillespie A.R., Gomes R.A.T., Martins É.d.S., Silva N.C.* Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil // *Remote Sens.* – 2014. – V. 6. – P. 330–351. – doi: 10.3390/rs6010330.
7. *Токарев С.В.* К методике карстолого-геоморфологического картирования посредством использования спутниковых данных о рельефе Земли // *Учен. зап. Тавр. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Сер. «География».* – 2011. – Т. 24, № 3. – С. 185–193.
8. *Шаврина Е.В., Малков В.Н., Гуркало Е.И.* Особенности развития и распространения карста Архангельской области // *Геоморфология.* – 2007. – № 2. – С. 90–101.
9. Структура и динамика природных компонентов Пинежского заповедника (Северная тайга ЕТР, Архангельская область): биоразнообразие и георазнообразие в карстовых областях / Отв. ред. Л.В. Пучнина, С.В. Горячкин, А.М. Рыков, М.В. Глазов. – Архангельск: СОЛТИ, 2000. – 267 с.
10. *Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В., Минеев А.Л.* Применение цифровых моделей рельефа (ЦМР) для выделения тектонических структур древних платформ (на примере северо-запада Русской плиты). – Пенза: Социосфера, 2020. – 378 с.
11. *Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В.* Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // *Пространство и время.* – 2015. – № 3. – С. 278–291.
12. *Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V. 2 // *Современные проблемы науки и образования.* – 2015. – № 2. – URL: www.science-education.ru/129-21949.
13. *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. – 176 с.
14. *Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 58–67. – doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67.
15. *Mark D.M.* Automatic detection of drainage networks from digital elevation models // *Cartographica.* – 1984. – V. 21. – P. 168–178. – doi: 10.3138/10LM-4435-6310-251R.
16. *Wang L., Liu H.* An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling // *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* – 2006. – V. 20. – No 2. – P. 193–213. – doi: 10.1080/13658810500433453.
17. *Lindsay J.B., Creed I.F.* Sensitivity of digital landscapes to artifact depressions in remotely-sensed DEMs // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* – 2005. – V. 71, No 9. – P. 1029–1036. – doi: 10.14358/PERS.71.9.1029.
18. *Oksanen J., Sarjakoski T.* Error propagation analysis of DEM-based drainage basin delineation // *Int. J. Remote Sens.* – 2005. – V. 26, No 14. – P. 3085–3102. – doi: 10.1080/01431160500057947.
19. *Fisher P., Tate N.* Causes and consequences of error in digital elevation models // *Progr. Phys. Geogr.* – 2006. – V. 30, No 4. – P. 467–489. – doi: 10.1191/0309133306pp492ra.
20. *Grimaldi S., Nardi F., Di Benedetto F., Instanbulluoglu E., Bras R.L.* A physically based method for removing pits in digital elevation models // *Adv. Water Resour.* – 2007. – V. 30, No 10. – P. 2115–2158. – doi: 10.1016/j.advwatres.2006.11.016.

21. *Arnold N.* A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values // *Prog. Phys. Geogr.* – 2010. – V. 34, No 6. – P. 781–809. – doi: 10.1177/0309133310384542.
22. *Pan F., Stieglitz M., Mckane R.* An algorithm for treating flat areas and depressions in digital elevation models using linear interpolation // *Water Resour. Res.* – 2012. – V. 48, No 6. – Art. W00L10, P. 1–13. – doi: 10.1029/2011WR010735.
23. *Fernandez A., Adamowski J., Petroselli A.* Analysis of the behavior of three digital elevation model correction methods on critical natural scenarios // *J. Hydrol.: Reg. Stud.* – 2016. – V. 8. – P. 304–315 –doi: 10.1016/j.ejrh.2016.09.009.
24. *Enyedi P., Pap M., Kovács Z., Takács-Szilágyi L., Szabó S.* Efficiency of local minima and GLM techniques in sinkhole extraction from a LiDAR-based terrain model // *Int. J. Digital Earth.* – 2019. – V. 12, No 9. – P. 1067–1082. – doi: 10.1080/17538947.2018.1501107.
25. *Garbrecht J., Martz L.W.* Digital elevation model issues in water resources modeling // *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems.* – 2000. – URL: <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm/>.
26. *Mackay D.S., Band L.E.* Extraction and representation of nested catchment areas from digital elevation models in lake-dominated topography // *Water Resour. Res.* – 1998. – V. 34, No 4. – P. 897–901. – doi: 10.1029/98WR00094.
27. *Lindsay J.B.* Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models // *Hydrol. Processes.* – 2016. – V. 30, No 6. – P. 846–857. – doi: 10.1002/hyp.10648.
28. *Pardo-Iguzquiza E., Pulido-Bosch A., Lopez-Chicano M., Duran J.J.* Morphometric analysis of karst depressions on a Mediterranean karst massif // *Geografis. Ann.: Ser. A, Phys. Geogr.* – 2016. – V. 98. – P. 247–263. – doi: 10.1111/geoa.12135.
29. *Hofierka J., Gallay M., Bandura P., Šašak J.* Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis // *Geomorphology.* – 2018. – V. 308. – P. 265–277. – doi: 10.1016/j.geomorph.2018.02.004.
30. *Zumpano V., Pisano L., Parise M.* An integrated framework to identify and analyze karst sinkholes // *Geomorphology.* – 2019. – V. 332. – P. 213–225. – doi: 10.1016/j.geomorph.2019.02.013
31. *Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Науменко В.Г., Токарев С.В.* Оценка мощности эпикарстовой зоны по распределению глубин воронок // *Спелеология и карстология.* – 2009. – № 3. – С. 26–38.
32. *Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б.* Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2020. – Т. 17, № 7. – С. 117–127. – doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.
33. *Polyakova E., Gofarov M., Kutinov Yu., Beljaev V., Chistova Z., Neverov N., Staritsyn V., Mineev A., Durynin S.* Erosion processes in karst landscapes of the Russian plain northern taiga, based on digital elevation modelling // *J. Mt. Sci.* – 2016. – V. 13, No 4. – P. 569–580. – doi: 10.1007/s11629-015-3642-3.
34. *Чикишев А.Г.* Карст Русской равнины. – М.: Наука, 1978. – 192 с.
35. *Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б.* Геоэкологическая оценка вероятности активизации карстовых процессов на основе цифрового моделирования рельефа // *Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата «ГЕОРИСК – 2018»:* Материалы X Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. – М.: РУДН, 2018. – Т. 2. – С. 221–225.

36. *Торсуев Н.П., Левин С.А.* Географические аспекты изучения равнинного карста. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1980. – 208 с.
37. *Neverov N.A., Belyaev V.V., Chistova Z.B., Kutinov Y.G., Staritsyn V.V., Polyakova E.V., Mineev A.L.* Effects of geo-ecological conditions on larch wood variations in the North European part of Russia (Arkhangelsk region) // *J. For. Sci.* – 2017. – V. 63, No 4. – P. 192–197. – doi: 10.17221/102/2015-JFS.
38. *Губайдуллин М.Г.* Геоэкологические условия освоения минерально-сырьевых ресурсов Европейского Севера России. – Архангельск: Помор. гос. ун-т, 2002. – 310 с.
39. *Полякова Е.В.* Учет геоморфометрических параметров рельефа при ведении хозяйственной деятельности на территории Архангельской области // *Евразийский союз ученых.* – 2019. – № 3-2. – С. 33–37. – doi: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.60.33-37.
40. *Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б.* Применение геоморфометрического анализа рельефа при осуществлении хозяйственной деятельности на территории Архангельской области // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* – 2021. – № 2. – С. 86–95 – doi: 10.31857/S0869780921020065.

Поступила в редакцию
21.04.2021

Полякова Елена Викторовна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН
наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, 163000, Россия
E-mail: lenpo26@yandex.ru

Кутинов Юрий Григорьевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН
наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, 163000, Россия
E-mail: kutinov@fciactic.ru

Минеев Александр Леонидович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН
наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, 163000, Россия
E-mail: mineew.al@gmail.com

Чистова Зинаида Борисовна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН
наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, 163000, Россия
E-mail: zchistova@yandex.ru

Беленович Таисия Яковлевна, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН
наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, 163000, Россия
E-mail: belenovichtya@yandex.ru

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319

Using the ASTER GDEM v.2 Global Digital Elevation Model to Identify Areas of Possible Activation of Karst Processes in the Arkhangelsk Region (Russia)*E.V. Polyakova*^{*}, *Y.G. Kutinov*^{**}, *A.L. Mineev*^{***}, *Z.B. Chistova*^{****}, *T.Ya. Belenovich*^{*****}*N.P. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, 163000 Russia*E-mail: **lenpo26@yandex.ru, **kutinov@fciactic.ru, ***mineew.al@gmail.com,
****zchistova@yandex.ru, *****belenovichtya@yandex.ru*

Received April 21, 2021

Abstract

The possibility of applying the method of detecting drainless depressions, which is used in hydrological correction of the digital elevation model, to identify areas of probable activation of the karst processes in the territory of the Arkhangelsk region was considered. This approach is especially relevant for northern forested territories subjected to continuously increasing anthropogenic activity. Errors (depressions) eliminated by the hydrological correction procedure are not always false. They can be natural landforms, especially in karst areas. Hydrological correction of the digital elevation model of the Arkhangelsk region (based on ASTER GDEM v.2) was performed. A vector layer of depressions in the region was obtained. The density of drainless depressions per unit area was calculated. The resulting map showing the density of drainless depressions was compared with the distribution of karst rocks in the Arkhangelsk region. It was found that the areas of maximum open karst development are associated with a low density of drainless depressions. The highest density of drainless depressions occurs in the territory with carbonate-covered and buried karst.

Keywords: digital elevation model, hydrological correction, drainless depression, karst rocks

Acknowledgements. This research was performed as part of the state assignment no. AAAA-A18-118012390305-7 for N.P. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences and supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60024).

Figure Captions

- Fig. 1. Distribution of the karst rocks along the territory of the Arkhangelsk region: 1 – karst development band, 2 – geological age of the rocks: AR – Archaean, AR-PR – Archaean-Proterozoic, PR – Proterozoic, C₂ – Middle Carboniferous, C₂-C₃ – Middle-Upper Carboniferous, P₁ – Lower Permian, P₂ – Upper Permian, T – Triassic, J – Jurassic.
- Fig. 2. Illustration of how the method in Wang L. и Liu H. [16] works on the real terrain surface: *a* – initial DEM of the Arkhangelsk region, *b* – terrain fragment with the imposed “mask” of depressions (purple color), *c* – fragment of the terrain with depressions before correction, *d* – fragment of the terrain with filled depressions after correction.
- Fig. 3. Fill-up depth values of the depressions, m (*a*) and vectorized mask of the depressions with distant water bodies (*b*).
- Fig. 4. Subdivision of the Arkhangelsk region territory into 10×10 km squares for calculation of centroids (*a*) and density of the drainless depressions, number/100 km² (*b*).
- Fig. 5. Topology of the depressions on the DEM by [27], authors’ translation.

Fig. 6. Density of the drainless depressions and distribution of the karst rocks along the territory of the Arkhangelsk region: 1 – zones of association: I – right bank, II – left bank of the Northern Dvina River.

Fig. 7. Relationship between the sources of anthropogenic impact and the density of drainless depressions: 1 – zones of intensive industrial impact; 2 – mining zones; 3 – zone of launch site impact; 4 – zones of spent rocket stage falloff; 5 – public and federal roads; 6-13 – deposits: 6 – diamonds; 7 – bauxites; 8 – gypsum; 9 – limestones; 10 – ragstones; 11 – clays; 12 – fresh groundwaters; 13 – mineral groundwaters; 14 – TPP; 15 – large diesel power plants.

Fig. 8. Density of the drainless depressions and distribution of the karst rocks along the territory of the Arkhangelsk region: 1 – zones that differ in the density of drainless depressions: I – right bank, II – left bank of the Northern Dvina River.

References

1. Kosheleva T.M. The problem of using karst landscapes when placing solid waste landfills in the Nizhny Novgorod region. *Izv. Samar. Nauchn. Tsentra Ross. Akad. Nauk*, 2009, vol. 11, no. 1, pp. 219–222. (In Russian)
2. *Opasnye ekzogennye protsessy* [Dangerous Exogenous Processes]. Osipov V.I. (Ed.). Moscow, GEOS, 1999. 290 p. (In Russian)
3. Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Mineev A.L., Chistova Z.B. Digital elevation modeling for estimating the probability of erosion processes in the northern regions of Russia. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 95–104. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104. (In Russian)
4. Shavrina E.V. Modern development of underground and surface karst in the southeast of the White Sea-Kuloi plateau. *Vopr. Geogr.*, 2018, no. 147, pp. 88–106. (In Russian)
5. Polyakova E.V. Geomorphometric approach in geoecological studies of the northern territories of Russia. *Usp. Sovrem. Estestvozn.*, 2018, no. 3, pp. 117–122. doi: 10.17513/use.36712. (In Russian)
6. Carvalho Júnior O.A de., Guimarães R.F., Montgomery D.R., Gillespie A.R., Gomes R.A.T., Martins É.d.S., Silva N.C. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-Derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. *Remote Sens.*, 2014, vol. 6, pp. 330–351. doi: 10.3390/rs6010330.
7. Tokarev S.V. On the method of karst and geomorphological mapping with the help of satellite data on the Earth's relief. *Uch. Zap. Tavricheskogo Natl. Univ. im. V.I. Vernadskogo. Ser. "Geogr."*, 2011, vol. 24, no. 3, pp. 185–193. (In Russian)
8. 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)
9. Puchnina L.V., Goryachkin S.V., Rykov A.M., Glazov M.V. *Struktura i dinamika prirodnykh komponentov Pinezhskogo zapovednika (Severnaya taiga ETR, Arkhangel'skaya oblast'): bioraznoobrazie i georaznoobrazie v karstovykh oblastiakh* [Structure and Dynamics of Natural Components of the Pinega Nature Reserve (Northern Taiga of European Russia, Arkhangelsk Region): Biodiversity and Geodiversity in Karst Regions]. Puchnina L.V., Goryachkin S.V., Rykov A.M., Glazov M.V. (Eds.). Arkhangelsk, SOLTI, 2000. 267 p. (In Russian)
10. Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Polyakova E.V., Mineev A.L. *Primenenie tsifrovyykh modelei rel'efa (TsMR) dlya vydeleniya tektonicheskikh struktur drevnikh platform (na primere severo-zapada Russkoi plity)* [The Use of Digital Elevation Models (DEM) to Identify Tectonic Structures of Ancient Platforms (Based on the Northwest of the Russian Plate)]. Penza, Sotsiosfera, 2020. 378 p. (In Russian)
11. Mineev A.L., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Polyakova E.V. Making a digital elevation model to study exogenous processes in the northern territories of the Russian Federation. *Prostranstvo Vremya*, 2015, no. 3, pp. 278–291. (In Russian)
12. Mineev A.L., Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B. Methodical aspects of creating a digital elevation model of the Arkhangelsk region based on ASTER GDEM V. 2. *Sovrem. Probl. Nauki Obraz.*, 2015, no. 2. Available at: www.science-education.ru/129-21949. (In Russian)
13. Kutinov Yu.G., Mineev A.L., Polyakova E.V., Chistova Z.B. *Vybor bazovoi tsifrovoi modeli rel'efa (TsMR) ravninnykh territorii Severa Evrazii i ee podgotovka dlya geologicheskogo raioni-*

- rovaniya (na primere Arkhangel'skoi oblasti)* [Choosing the Basic Digital Elevation Model (DEM) of the Plain Territories of Northern Eurasia and Adjusting It for Geological Zoning (Based on the Arkhangelsk Region)]. Penza, Sotsiosfera, 2019. 176 p. (In Russian)
14. Mineev A.L., Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B. The reliability of a digital elevation model of the Arkhangelsk region for geocological research. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 58–67. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67. (In Russian)
 15. Mark D.M. Automatic detection of drainage networks from digital elevation models. *Cartographica*, 1984, vol. 21, pp. 168–178. doi: 10.3138/10LM-4435-6310-251R.
 16. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 2006, vol. 20, no. 2, pp. 193–213. doi: 10.1080/13658810500433453.
 17. Lindsay J.B., Creed I.F. Sensitivity of digital landscapes to artifact depressions in remotely-sensed DEMs. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 2005, vol. 71, no. 9, pp. 1029–1036. doi: 10.14358/PERS.71.9.1029.
 18. Oksanen J., Sarjakoski T. Error propagation analysis of DEM-based drainage basin delineation. *Int. J. Remote Sens.*, 2005, vol. 26, no. 14, pp. 3085–3102. doi: 10.1080/01431160500057947.
 19. Fisher P., Tate N. Causes and consequences of error in digital elevation models. *Prog. Phys. Geogr.*, 2006, vol. 30, no. 4, pp. 467–489. doi: 10.1191/0309133306pp492ra.
 20. Grimaldi S., Nardi F., Di Benedetto F., Instanbulluoglu E., Bras R.L. A physically based method for removing pits in digital elevation models. *Adv. Water Resour.*, 2007, vol. 30, no. 10, pp. 2115–2158. doi: 10.1016/j.advwatres.2006.11.016.
 21. Arnold N. A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values. *Prog. Phys. Geogr.*, 2010, vol. 34, no. 6, pp. 781–809. doi: 10.1177/0309133310384542.
 22. Pan F., Stieglitz M., Mckane R. An algorithm for treating flat areas and depressions in digital elevation models using linear interpolation. *Water Resour. Res.*, 2012, vol. 48, no. 6, art. W00L10, pp. 1–13. doi: 10.1029/2011WR010735.
 23. Fernandez A., Adamowskib J., Petroselli A. Analysis of the behavior of three digital elevation model correction methods on critical natural scenarios. *J. Hydrol.: Reg. Stud.*, 2016, vol. 8, pp. 304–315. doi: 10.1016/j.ejrh.2016.09.009.
 24. Enyedi P., Pap M., Kovács Z., Takács-Szilágyi L., Szabó S. Efficiency of local minima and GLM techniques in sinkhole extraction from a LiDAR-based terrain model. *Int. J. Digital Earth*, 2019, vol. 12, no. 9, pp. 1067–1082. doi: 10.1080/17538947.2018.1501107.
 25. Garbrecht J., Martz L.W. Digital elevation model issues in water resources modeling. In: *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems*, 2000. Available at: <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm>.
 26. Mackay D.S., Band L.E. Extraction and representation of nested catchment areas from digital elevation models in lake-dominated topography. *Water Resour. Res.*, 1998, vol. 34, no. 4, pp. 897–901. doi: 10.1029/98WR00094.
 27. Lindsay J.B. Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models. *Hydrol. Processes*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 846–857. doi: 10.1002/hyp.10648.
 28. Pardo-Iguzquiza E., Pulido-Bosch A., Lopez-Chicano M., Duran J.J. Morphometric analysis of karst depressions on a Mediterranean karst massif. *Geografiz. Ann.: Ser. A, Phys. Geogr.*, 2016, vol. 98, pp. 247–263. doi: 10.1111/geoa.12135.
 29. Hofierka J., Gallay M., Bandura P., Šašak J. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. *Geomorphology*, 2018, vol. 308, pp. 265–277. doi: 10.1016/j.geomorph.2018.02.004.
 30. Zumpano V., Pisano L., Parise M. An integrated framework to identify and analyze karst sinkholes. *Geomorphology*, 2019, vol. 332, pp. 213–225. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.02.013.
 31. Klimchuk A.B., Amelichev G.N., Naumenko V.G., Tokarev S.V. Estimating the epikarst zone thickness by the distribution of craters' depths. *Speleol. Karstol.*, 2009, no. 3, pp. 26–38. (In Russian)

32. Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Mineev A.L., Chistova Z.B. Analysis of the possibility of using digital elevation models ASTER GDEM v2 and ArcticDEM to study of the Arctic territories of Russia. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 7, pp. 117–127. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127. (In Russian)
33. Polyakova E., Gofarov M., Kutinov Yu., Beljaev V., Chistova Z., Neverov N., Staritsyn V., Mineev A., Durynin S. Erosion processes in karst landscapes of the Russian plain northern taiga, based on digital elevation modeling. *J. Mt. Sci.*, 2016, vol. 13, no. 4, pp. 569–580. doi: 10.1007/s11629-015-3642-3.
34. Chikishev A.G. *Karst Russkoi ravniny* [Karst of the Russian Plain]. Moscow, Nauka, 1978. 192 p. (In Russian)
35. Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Mineev A.L., Chistova Z.B. Geoecological assessment of the probability of activation of karst processes based on digital elevation modeling. *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnyimi riskami s uchetom global'nogo izmeneniya klimata "GEORISK – 2018": Materialy X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Analysis, Forecast, and Management of Natural Risks in the Face of Global Climate Change "GEORISK – 2018": Proc. X Int. Sci.-Pract. Conf.]. Vol. 2. Moscow, RUDN, 2018, pp. 221–225. (In Russian)
36. Torsuev N.P., Levin S.A. *Geograficheskie aspekty izucheniya ravninnogo karsta* [Geographical Aspects of Studying Plain Karst]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1980. 208 p. (In Russian)
37. Neverov N.A., Belyaev V.V., Chistova Z.B., Kutinov Y.G., Staritsyn V.V., Polyakova E.V., Mineev A.L. Effects of geo-ecological conditions on larch wood variations in the North European part of Russia (Arkhangelsk region). *J. For. Sci.*, 2017, vol. 63, no. 4, pp. 192–197. doi: 10.17221/102/2015-JFS.
38. Gubaidullin M.G. *Geoekologicheskie usloviya osvoeniya mineral'no-syr'evykh resursov Evropeiskogo Severa Rossii* [Geoecological Conditions for the Development of Mineral Resources in the European North of Russia]. Arkhangelsk, Pomor. Gosuniv., 2002. 310 p. (In Russian)
39. Polyakova E.V. Accounting the geomorphometric parameters of the relief when conducting economic activities on the territory of the Arkhangelsk region. *Evrasiiskii Soyuz Uch.*, 2019, no. 3-2, pp. 33–37. doi: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.60.33-37 (In Russian)
40. Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Mineev A.L., Chistova Z.B. Using geomorphometric analysis of the relief in the implementation of economic activities in the territory of the Arkhangelsk region. *Geokol. Inzhenernaya Geol. Gidrogeol. Geokriol.*, 2021, no. 2, pp. 86–95. doi: 10.31857/S0869780921020065. (In Russian)

Для цитирования: Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б., Беленович Т.Я. Применение глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v.2 для выделения районов возможной активизации карстовых процессов на территории Архангельской области // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2021. – Т. 163, кн. 2. – С. 302–319. – doi: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.

For citation: Polyakova E.V., Kutinov Y.G., Mineev A.L., Chistova Z.B., Belenovich T.Ya. 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. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2021, vol. 163, no. 2, pp. 302–319. doi: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319. (In Russian)