

---

---

**МЕТОДОЛОГИЯ  
И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

---

---

УДК 551.435.83:528.8.044.204

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАРСТОВОГО РЕЛЬЕФА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ  
ПЛАТО ЛАГО-НАКИ МЕТОДАМИ ВЫСОТНОГО ЛАЗЕРНОГО  
СКАНИРОВАНИЯ (LIDAR) И ДЕШИФРИРОВАНИЯ  
АЭРОФОТОСНИМКОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

© 2015 г. Т. В. Орлов, С. А. Садков

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер., д.13, стр.2, Москва, 101000 Россия. E-mail: dist@geoenv.ru*

Поступила в редакцию 25.09.2014 г.

В условиях высокой залесенности использование высотного лазерного сканирования (LIDAR) дает возможность получения данных высокой точности о текущем состоянии форм рельефа. На основе облака точек LIDAR созданы растровые цифровые модели рельефа (ЦМР) 2-х ключевых участков плато Лаго-наки (Краснодарский край и Республика Адыгея). Проведена оценка распространения на территории плато карстовых понижений с помощью аэрофотоснимков и ЦМР, построенной по данным LIDAR. Апробированы различные методы анализа карстового рельефа с использованием открытого программного обеспечения SAGA-GIS (растеризация данных лазерного сканирования и расчет морфометрических индексов) и ImageJ (преобразования Фурье и двумерный частотный фильтр). Исследовано состояние карстового рельефа территории методами математической морфологии ландшафтов.

**Ключевые слова:** *карст, LIDAR, цифровая модель рельефа, морфометрия рельефа, математическая морфология ландшафтов, ImageJ.*

### ВВЕДЕНИЕ

Лазерная локация – быстро развивающаяся новейшая отрасль цифровой фотограмметрии, широко применяемая в различных науках о Земле, в том числе при решении задач инженерного проектирования, земле- и лесоустройства, экологического мониторинга и др. Использование лазерного сканера (или лидара) позволяет в короткие сроки получать большие объемы геоданных с абсолютной точностью сантиметрового порядка как по горизонтали, так и по вертикали. Дополнительные преимущества метода состоят в получении готовых данных в электронном формате, удобном для последующей компьютерной обработки и интеграции с геоданными из других источников. Определенные ограничения на возможности метода накладывают дискретный характер получаемых данных, сильная зависимость их точности от высоты съемки и состояния атмосферы [5].

Весьма ценными данные лазерного сканирования оказываются при выявлении быстро

развивающихся карстовых форм рельефа на залесенных территориях при слабо нарушенном лесном пологом. В отличие от стереотопографического метода, лидар не зависит ни от прозрачности крон, ни от высотной структуры древостоя. С другой стороны, преимущества перед полевыми геодезическими работами в скорости измерений делают метод оптимальным для мониторинга активизации потенциально быстро развивающихся карстовых процессов.

Высокая точность получаемых при лазерном сканировании данных о рельефе позволяет наряду с пространственным расположением карстовых форм рельефа получить информацию об их морфометрии: глубинах, конфигурации склонов и днища, наличии провалов на дне воронок.

Исследование морфометрических характеристик рельефа может быть проведено как непосредственно по существующей модели рельефа, так и по виртуальной модели, полученной в результате фильтрации высоких частот растровой ЦМР.

## ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

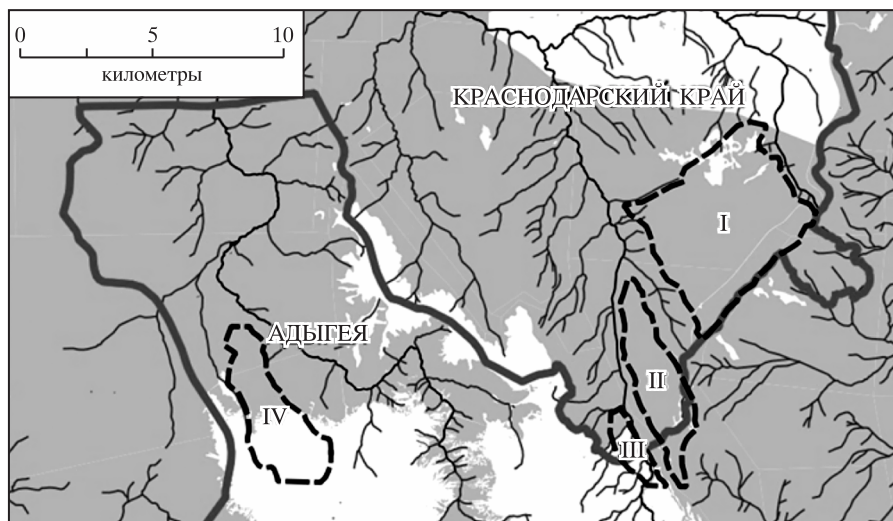
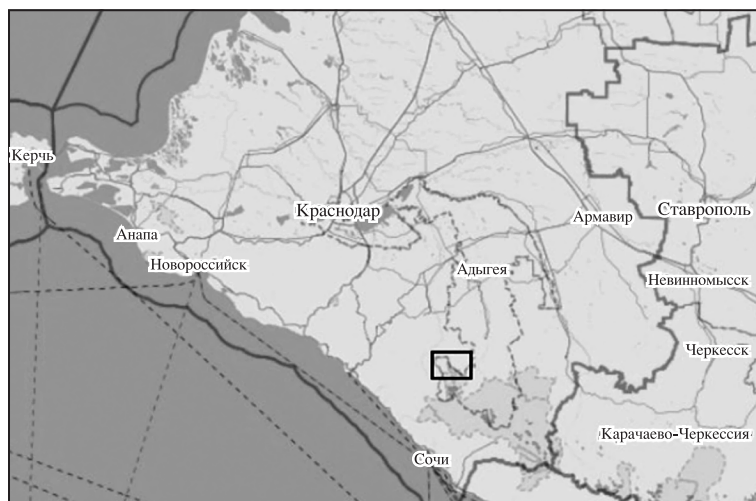
Район исследования – восточная часть плато Лаго-наки (граница Краснодарского края и Республики Адыгея). Собственно, плато располагается на северном макросклоне Западного Кавказа, от предгорий с абсолютными высотами порядка 800–1000 м над уровнем моря до горы Фишт (рис. 1).

Рельеф территории по большей части представляет собой ряд платообразных поверхностей, имеющих северный уклон различной крутизны, ограниченных обрывами и долинами горных рек. На поверхностях плато развиваются карстовые формы рельефа: провалы, воронки, блюдца.

В качестве ключевых выбраны 2 участка плато на северо-восточной и северо-западной оконечностях плато. Они имеют высокую залесенность

(до 95%), что затрудняет картирование поражения этих территорий карстовым процессом. Склоны покрыты (до 1200–1600 м) преимущественно букowymi лесами (из бука восточного, часто с грабом кавказским) на горно-лесных бурых и дерново-карбонатных почвах [4].

Северо-восточный участок охватывает зеленое подножие плато Лаго-наки на территории Краснодарского края, расчлененное речными долинами на три неравных наклонных плато. Дневная поверхность водоразделов на этой территории сложена преимущественно элювиально-делювиальными отложениями дисперсной зоны коры выветривания коренных пород, слагающих водоразделы и пологие склоны. Преобладают суглинки с неокатанным обломочным материалом, обломками, щебнем и дресвой. Мощность этих отложений достигает до 15 м. Они подстилаются рифовыми обломочными и органогенными



**Рис. 1.** Расположение района исследования и ключевых участков (обозначены римскими цифрами).

карстующимися известняками лагонакской свиты средне-верхнеюрского возраста мощностью до 850 м<sup>1</sup>.

Наибольшая часть участка занимает северо-восточную оконечность Лаго-наки общей площадью 21,6 км<sup>2</sup>. Он ограничен долинами рек Курджипс и Мезмай и простирается от хребта Азиш-Тау (1600 м) до Камышановой поляны на севере (1200 м). Другая часть занимает плато Утюг (площадь 6,7 км<sup>2</sup>), при перепаде высот от 1300 до 1700 м н.у.м. Небольшая слабо закарстованная часть участка площадью 1,9 км<sup>2</sup>, сильно расчлененная речными долинами, занимает юго-западную оконечность северо-восточного участка на территории Республики Адыгея. Перепад высот на этом участке наименьший: от 1500 до 1700 м.

Северо-западный ключевой участок расположен на территории Майкопского района Республики Адыгея, в междуречье рек Цице и Шумичка (площадь 7,3 км<sup>2</sup>). В отличие от остальных исследуемых территорий, поверхность данного участка сложена ледниково-флювиогляциальными отложениями водораздельных и высоких частей склонов: плохо окатанными глыбами, валунно-галечниковыми отложениями, щебнем и дресвой с песками и суглинками. Подстилаются они карстующимися известняками средне-верхнеюрского возраста (см. сноску 1).

Перепад абсолютных высот составляет от 950 до 2000 м н.у.м. Участок выделяется своим расположением на верхней границе леса. Северная его часть занята широколиственными лесами, южная – луговой альпийской и субальпийской растительностью, и лежит на территории Кавказского Биосферного заповедника. Таким образом, на данном участке верхняя граница леса лежит существенно ниже типичного для данного типа ландшафтов уровня, равного 2300–2400 м [4].

В пределах исследуемой территории было выделено 4 ключевых участка, каждый из которых представляет собой наклонное плато, в той или иной степени пораженное карстовыми процессами (см. рис. 1).

<sup>1</sup> Экспертная оценка результатов инженерных изысканий (в том числе архивных данных) для разработки проектов планировки территорий горно-рекреационных курортов “Лаго-наки” и “Матлас”, а также анализ размещения участков застройки с точки зрения опасности геологических процессов//Научно-технический отчет по проекту “Проект создания туристического кластера в Северо-Кавказском федеральном округе, Краснодарском крае и Республике Адыгея”. Этап 3. Книга 5. Актуализация картографических материалов по территории горно-рекреационного курорта “Лаго-наки”. М.: ИГЭ РАН, 2012. 42 с.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных данных для построения цифровой модели рельефа использовались результаты лазерного сканирования. Средняя плотность точек составляла около 1,5 млн точек на км<sup>2</sup> (1,5 точ./м<sup>2</sup>). Густое расчленение рельефа территории при значительных перепадах высот обуславливает весьма неравномерную плотность покрытия территории точками лазерного сканирования (рис. 2).

Были использованы данные лидара, полученные в ходе инженерно-геологических изысканий по проекту создания туристического кластера в Южном Федеральном округе, Краснодарском крае и Республике Адыгея. Полевая заверка полученных результатов не проводилась.

Для сравнения с результатами дешифрирования данных высотного лазерного сканирования использовались аэрофотоснимки (АФС) в видимом диапазоне с пространственным разрешением 20 см/пиксель.

Методика исследований включала следующие основные элементы:

- создание ЦМР на основе данных высотного лазерного сканирования с последующим визуальным дешифрированием карстовых форм рельефа по ЦМР;
- визуальное дешифрирование карстовых форм рельефа по АФС видимого диапазона;
- сопоставление результатов дешифрирования карстовых форм рельефа с двумя указанными выше методами;
- исследование ландшафтного рисунка территории, пораженной карстовыми процессами, методом математической морфологии ландшафта.

В среднем плотность точек выполненной лидарной съемки достаточна для создания растровой ЦМР горных территорий с величиной пикселя 20 см. Однако при дешифрировании было установлено, что на ключевых участках допустимо увеличить ее до 2 м. Информативность модели при этом не снижается, однако многократно возрастает скорость ее обработки. Аналогичный результат демонстрирует применение высотного лазерного сканирования на других горных территориях [9]. Увеличение пространственного разрешения не имеет смысла ввиду неравномерного покрытия территории точками с отметками высот (см. рис. 2). На участках со слабым покрытием

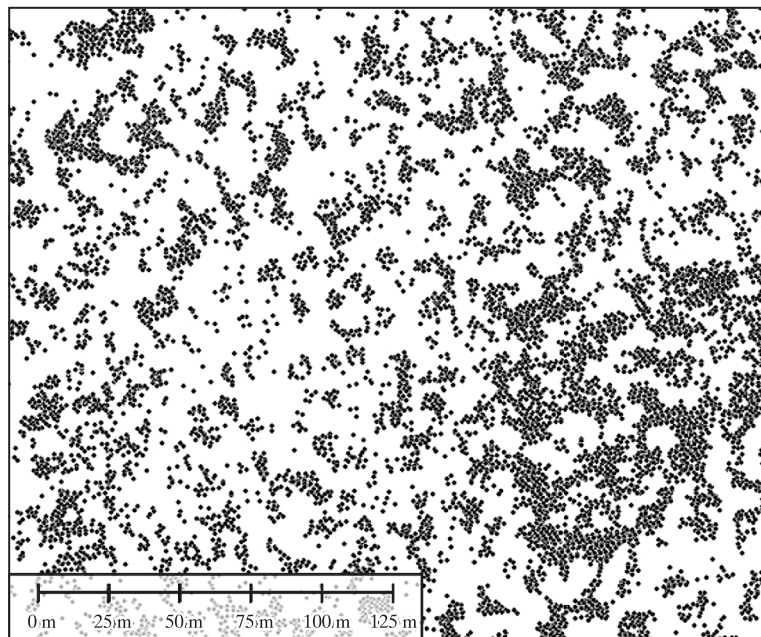


Рис. 2. Пример распределения точек на поверхности ключевого участка.

большинство пикселей более высокого разрешения не будут включать ни одной отметки и нести дополнительной информации о рельефе. На участках с высокой плотностью высотных отметок увеличенный размер пиксела позволяет компенсировать погрешности измерения высот. Кроме того, как будет показано ниже, характерные размеры карстовых форм составляют сотни метров в плане и метры-десятки метров по глубине, что лишает смысла точное отображение нанорельефа для задачи их картографирования.

Для равнинных территорий плотность от 1.2 точ./м<sup>2</sup> и выше позволяет практически полностью свести ошибки определения абсолютных высот к нулю [1]. Однако, учитывая большое разнообразие плотностей точек на различно ориентированных элементах рельефа сильно закарстованной территории, данная плотность не обеспечивает полного отсутствия ошибок, в связи с чем возникает необходимость дополнительной обработки ЦМР.

Растровая ЦМР создавалась методом кригинга [3] и в первоначальном варианте содержала большое количество шумов, затруднявших визуальное дешифрирование помех и расчет морфометрических характеристик рельефа (рис. 3 а).

Для оценки параметров фильтрации ЦМР использована Фурье-фильтрация. Установлено, что большинство шумов устраняется при устранении волн длиной менее 10 м. В тестовом порядке были

опробованы также фильтр обратных расстояний и фильтр Ли, реализованные в SAGA-GIS. Наиболее приемлемый результат получен с помощью простого и быстрого сглаживающего фильтра (рис. 3 б–г).

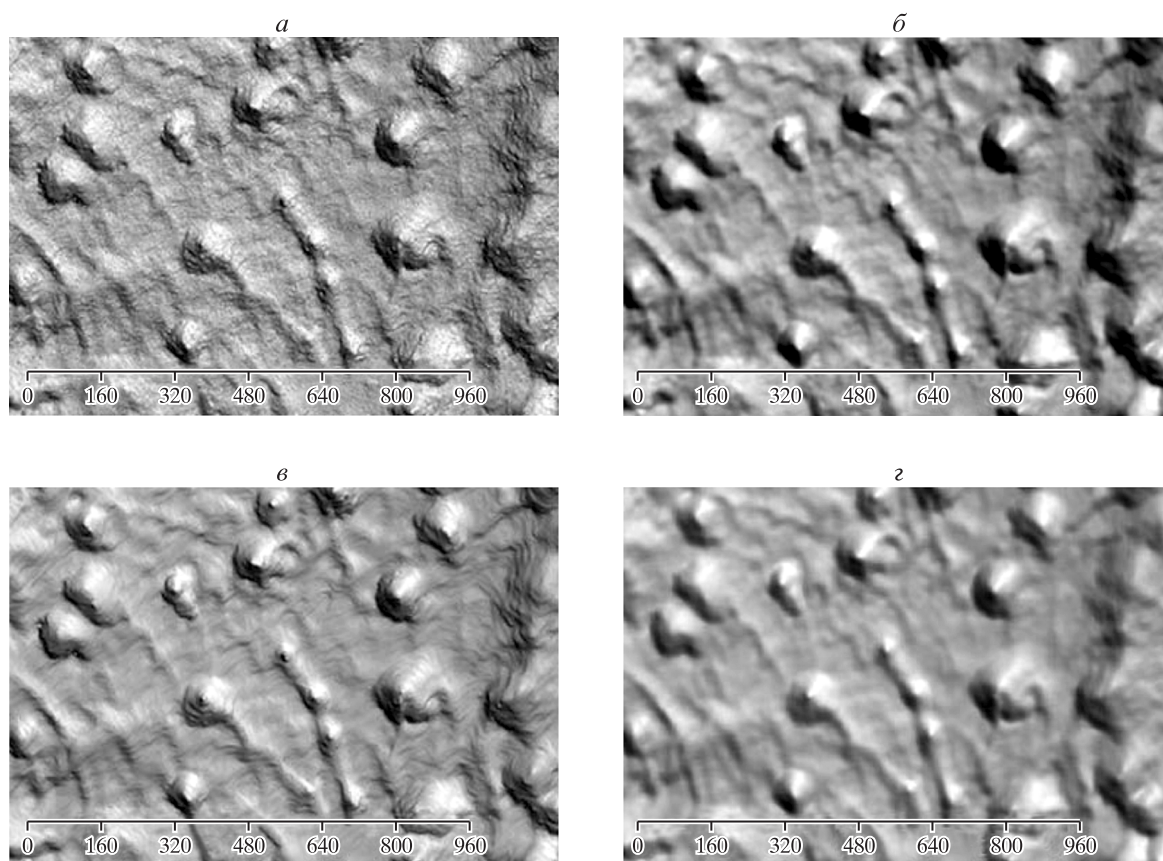
Дополнительную информацию о мезорельефе территории и его морфометрии можно получить с той же ЦМР, если устранить при помощи полосового фильтра волны длиной свыше 150 м (что соответствует максимальному размеру карстовых форм рельефа на данной территории). Полученная ЦМР позволяет оценивать восстановленный рельеф территории до его поражения карстом, что важно для районирования территории по карстовой опасности (рис. 4 а). Устранение более крупных волн сводит на нет возможность выделения крупных эрозионных форм рельефа: долин и балок, одновременно внося искажения в картину поверхностного стока (рис. 4 б).

Непосредственно воронки дешифрировались визуально по изображению градиентно окрашенной ЦМР с отмывкой рельефа. При этом сохранялась возможность дешифрирования различий между карстовыми понижениями различной формы: воронками и блюдцами (рис. 5 а). Также визуально выделялись участки с различным взаимным расположением карстовых форм и различной морфометрией рельефа (рис. 5 б).

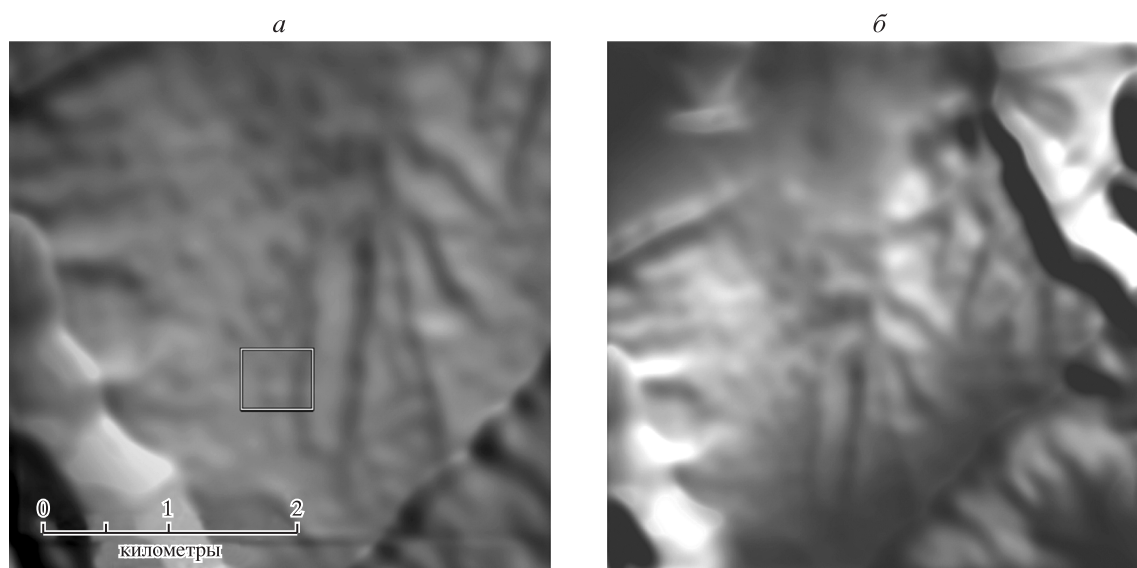
Дешифрирование АФС осуществлялось экспертным методом визуального дешифрирования с использованием эталонов [6–8]. В качестве дешифровочных признаков использовалось наличие или отсутствие древостоя. Дешифрирование понижений по изменениям текстуры древесных крон оказалось невозможным. Для сравнительной оценки качества дешифрирования сопоставлены количественные характеристики векторных слоев карстовых понижений ключевого участка I.

На основе векторного слоя воронок и имеющих данных о рельефе собраны данные об их площади и периметре, а также статистические характеристики распределения морфометрических параметров рельефа в пределах карстовых форм.

Для анализа использовались стандартные методы морфометрического анализа рельефа: крутизну склонов, плановую и профильную кривизну. Также рассчитывалась площадь водосбора для каждого пикселя раstra. Для оценки аккумуляции влаги рассчитывались локальный



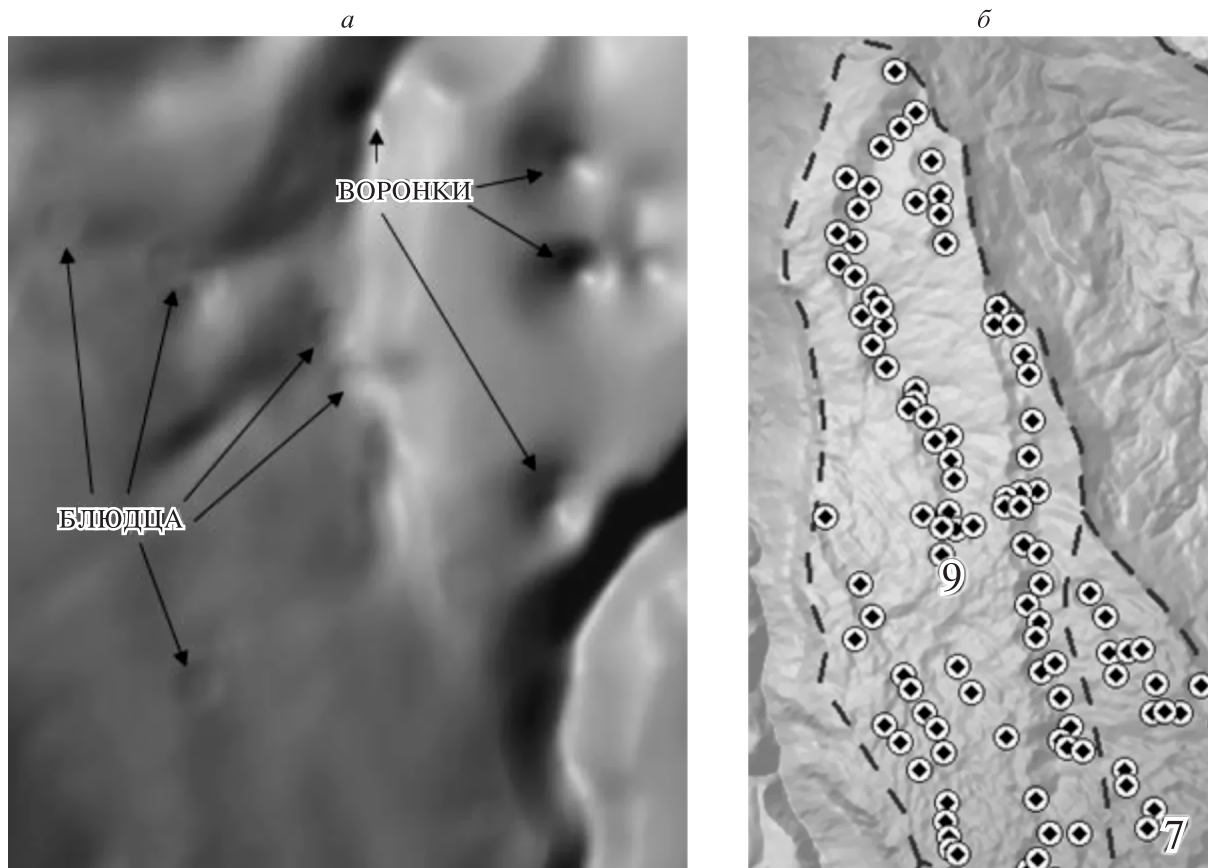
**Рис. 3.** Участки ЦМР, созданной на основе данных высотного лазерного сканирования: *а* – без фильтрации, *б* – фильтр Фурье с длиной волны от 10 м и выше, *в* – фильтр Ли, *г* – сглаживание по методу обратных расстояний.



**Рис. 4.** Участок ЦМР ключевого участка I после Фурье-фильтрации с размером пиксела 150 м (*а*) и 200 м (*б*). Прямоугольником выделен участок, показанный на рис. 3.

параметр – индекс конвергенции, и глобальный – топографический индекс влажности. В пределах воронки оценивались максимальные и средние значения крутизны склонов и площади водосбо-

ра. Для оценки индексов влажности и конвергенции использовались четыре параметра: минимум, максимум, разброс значений и среднее арифметическое.



**Рис. 5.** Морфометрические различия карстовых форм рельефа района исследования: *а* – карстовые блюдца и воронки на ключевом участке III; *б* – линейно вытянутые группы карстовых понижений в северной части плато Утюг.

Регулярно расположенные воронки образуют пятнистый ландшафтный рисунок плато с развитием карстовых процессов. На участках плато с однородными условиями параметры рисунка могут быть изучены на основе использования канонической математической модели ландшафтного рисунка территорий с развитием карстовых процессов [2]. В понятие однородности условий входят близкий вещественный состав поверхностных отложений в разных точках участка; близость вещественного состава подстилающих отложений; относительное постоянство мощности поверхностных отложений; похожесть уклонов поверхности в разных точках участка; отсутствие разрывных нарушений и погребенных ложбин и т.д. В то же время условие однородности не накладывает ограничений на вещественный состав отложений, уровень грунтовых вод, количество осадков, режим выпадения осадков, мощность снегового покрова и др. [2].

Ландшафтный рисунок однородной территории с развитием карстовых процессов имеет следующие статистически проверяемые свойства:

– соответствие распределения количества карстовых форм на случайно выбранной площадке пуассоновскому закону;

– соответствие распределения расстояний от центра заданной формы до центра ее ближайшей соседки распределению Рэлея;

– соответствие распределения площадей карстовых форм логнормальному закону [2].

Первые два утверждения справедливы при условии взаимно независимого возникновения карстовых форм на однородной территории. В нашем случае выполнялась проверка соответствия распределения расстояний между центрами ближайших соседних карстовых форм распределению Рэлея.

Невыполнение одного или нескольких из указанных утверждений будет свидетельствовать об отклонении реальных условий от ограничений канонической модели. Из физико-географических соображений в этом случае можно предположить следующие возможные несоответствия реальных условий модельным:

- взаимодействие ПТК понижений при высоких плотностях расположения, когда развиваются процессы перехвата стока между понижениями;
- невозможность возникновения понижений в пределах площади уже образовавшегося понижения;
- разное время формирования понижений;
- пространственная неоднородность распределения карстовых форм с их группировкой в иррегулярные или линейно вытянутые скопления в связи с неоднородностью карстующихся пород и перераспределением поверхностного стока.

В качестве возможных факторов, влияющих на формирование ландшафтного рисунка, рассмотрены:

– геологические: вещественный состав и мощность поверхностных и подстилающих отложений, залегание слоев, наличие разрывных нарушений;

– факторы рельефа: перепад высот, уклоны, плановая и профильная кривизна, коэффициент аккумуляции стока, удельная площадь водосбора и индекс влажности.

Для оценки геоморфологических условий формирования карстовых форм также проанализирована сглаженная ЦМР с удаленными карстовыми формами рельефа. Для этого использовался частотный фильтр Фурье с удалением длин менее 150 м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Путем растеризации данных лазерного сканирования получены ЦМР 4-х пробных участков с размером пикселя раstra 1 м. Различными методами фильтрации с них были удалены ошибки, связанные с недостаточной вертикальной точностью импульсного сканера и недостаточной плотностью точек. Предоставленная информация достаточна для изучения микрорельефа территории. Сопоставление с результатами дешифрирования аэрофотоснимка в видимом диапазоне свидетельствует, что точное пространственное положение и размеры карстовых понижений сильно отличаются от полученных по данным высотного лазерного сканирования (табл. 1).

Ни один из дешифровочных признаков на данных дистанционной съемки (цвет, фототон, текстура изображения) не позволяет очертить контуры

**Таблица 1.** Параметры карстового рельефа плато Лаго-наки (участок I) по результатам дешифрирования АФС и ЦМР, построенной по данным высотного лазерного сканирования

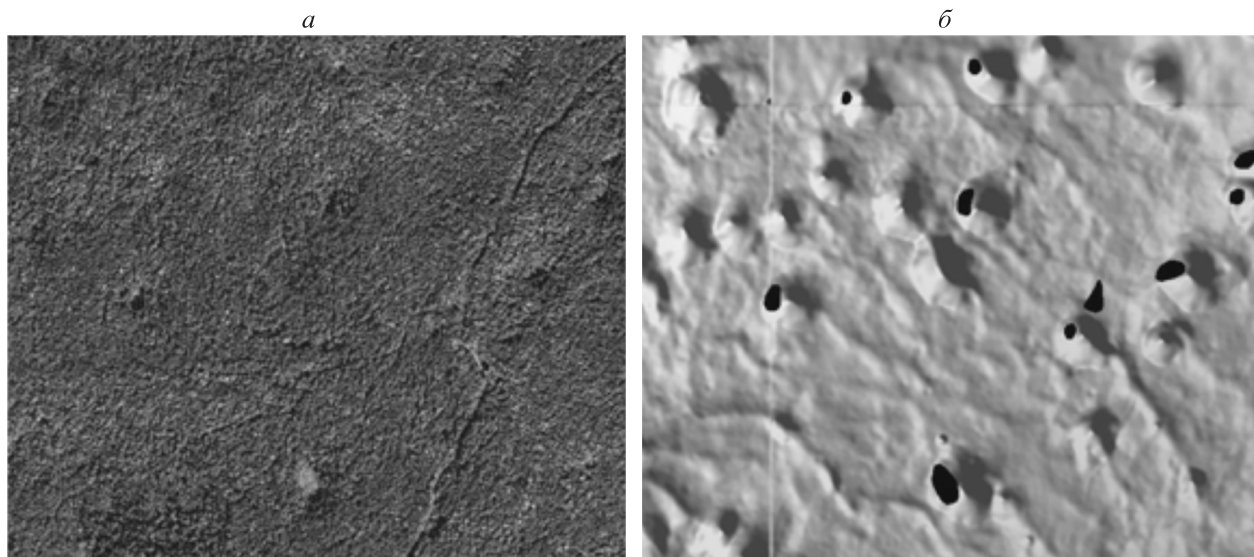
Группа параметров	Параметры	АФС	ЦМР
<b>Количество Глубина понижений</b>	Количество, шт.	174	<b>621</b>
	Минимальная глубина, м	–	<b>2.3</b>
	Максимальная глубина, м	–	<b>39.7</b>
	Средняя глубина, м	–	<b>7.12</b>
<b>Размеры понижений</b>	Средняя крутизна стенок, градусы	–	<b>11.97</b>
	Минимальная площадь, м <sup>2</sup>	221	<b>726</b>
	Максимальная площадь, м <sup>2</sup>	33 184	<b>37 973</b>
	Средняя площадь, м <sup>2</sup>	2 975	<b>8 046</b>
<b>Форма границы</b>	Средний диаметр, м	25.3	<b>48.6</b>
	Средний периметр, м	184.8	<b>328.3</b>
	Средний коэффициент извилистости границы	1.16	<b>1.07</b>
<b>Качество выявления</b>	Проценты от максимального количества	28	<b>100</b>
	Проценты от площади участка	2.56	<b>24.37</b>

ры карстовых понижений залесенных территорий, в отличие от ЦМР, полученной на основе данных лидара (рис. 6).

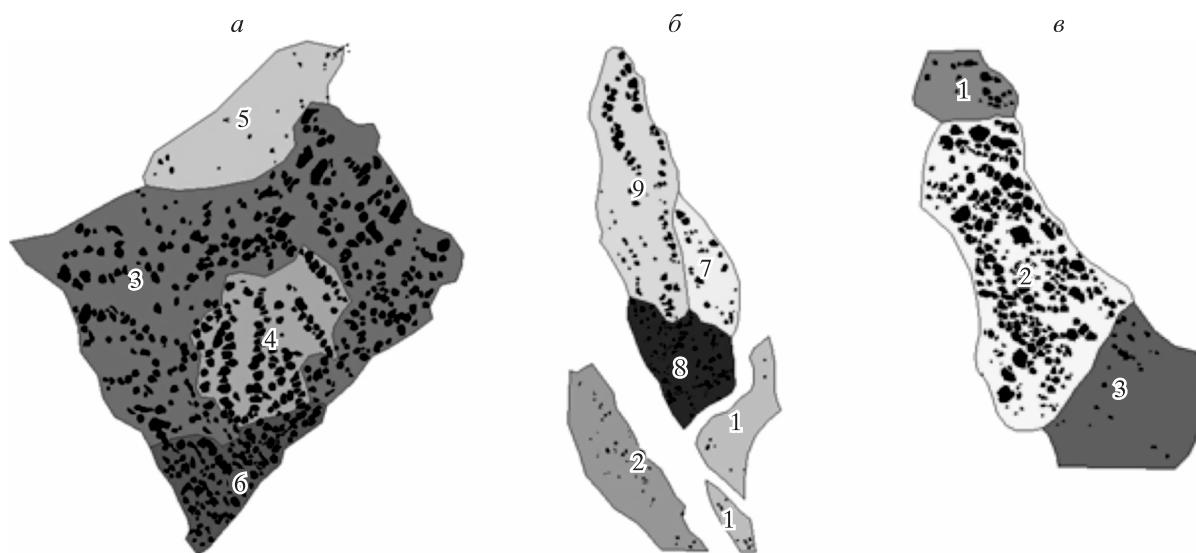
Созданная путем визуального дешифрирования ЦМР картосхема карстовых форм рельефа 4-х ключевых участков плато Лаго-наки свидетельствует о приуроченности карстовых понижений к поверхностям известняковых плато с абсолютными высотами 900–2500 м. В долинах, где мощность перекрывающих известняки четвертичных отложений превышает 10–20 м, аналогичные карстовые формы рельефа полностью отсутствуют.

В зависимости от плотности и упорядоченности расположения карстовых форм рельефа на 4-х участках путем визуального дешифрирования выделено 12 классов территории с различными характеристиками карстового рельефа (рис. 7). Морфометрические особенности карстовых форм рельефа для различных классов отражены в табл. 2–3.

Пространственное размещение карстовых форм на этих участках весьма неоднородно: встречаются участки с однородным размещением карстовых форм, с объединением воронок в группы: иррегу-



**Рис. 6.** Сравнение результатов дешифрирования карстовых понижений по результатам аэрофотосъемки (а) и ЦМР (б). На фоне ЦМР показаны воронки, дешифрированные по АФС.



**Рис. 7.** Участки с различными особенностями карстового рельефа на территории ключевых участков I (а), II–III (б) и IV (в). Масштаб 1:100 000, точки – карстовые формы.

лярные, либо линейно вытянутые вдоль ложбинообразных понижений микрорельефа. На некоторых участках оба типа расположения воронок встречаются одновременно. Указанная неоднородность может быть обусловлена как геологической неоднородностью территории (наличием зон трещиноватости или пониженной устойчивости к выветриванию), так и локальным перераспределением стока, обусловленным особенностями микрорельефа.

Последнее создает проблему при отнесении той или иной воронки (или карстоопасной тер-

ритории в целом) к соответствующему классу, а следовательно, при выявлении факторов карстовой опасности территории.

Статистический анализ распределения параметров ландшафтного рисунка (площади карстовых понижений и расстояния от заданного понижения до ближайшего соседа) выполнен для классов 4, 6, 8, 9 и 11. Классы 1, 2, 3, 5, 7, 10 и 12 представлены недостаточным количеством воронок, поэтому статистические методы к ним неприменимы. Результаты статистической проверки гипотез приведены на рис. 8, 9.



**Таблица 2.** Морфометрические характеристики рельефа ключевых участков и классов территорий в их пределах с различными характеристиками развития карстовых форм

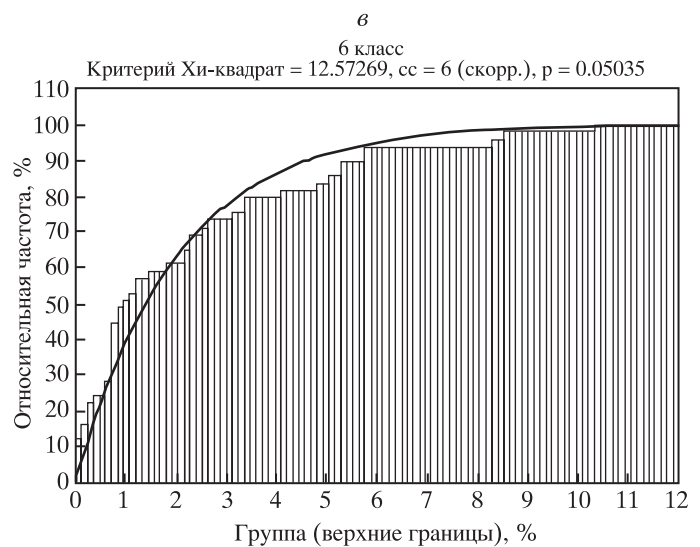
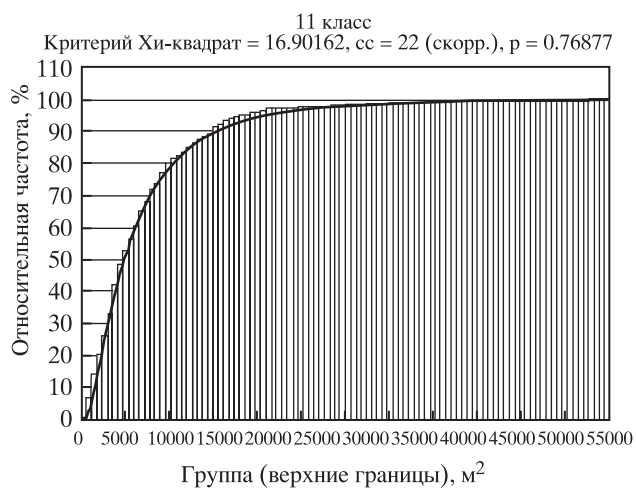
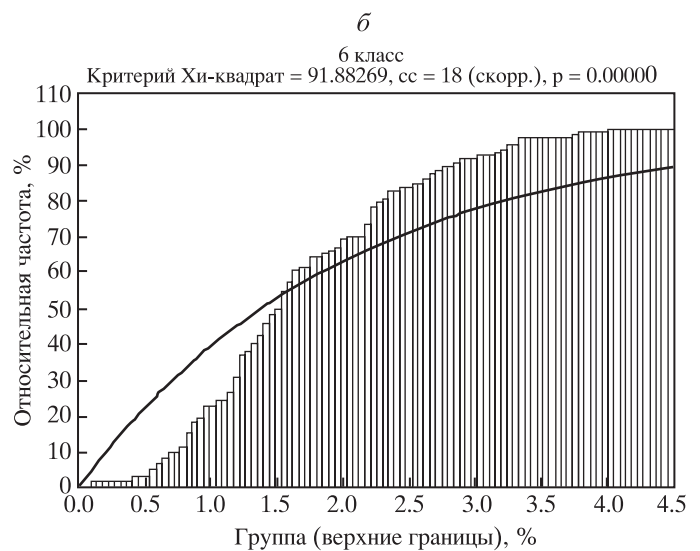
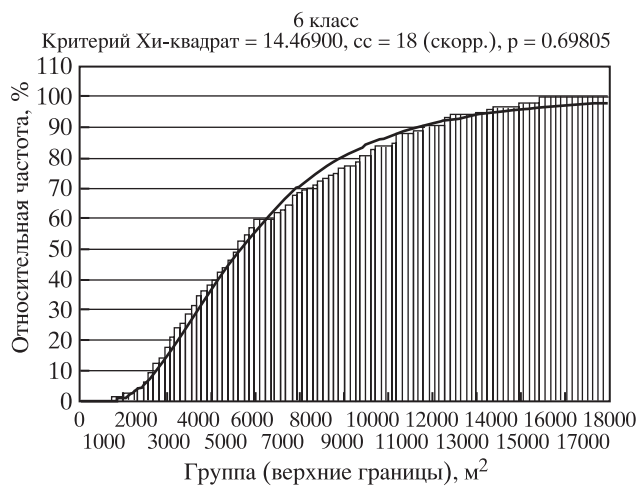
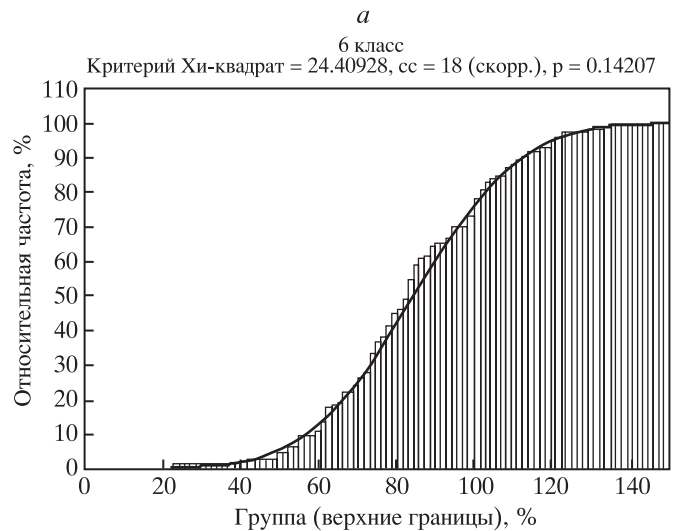
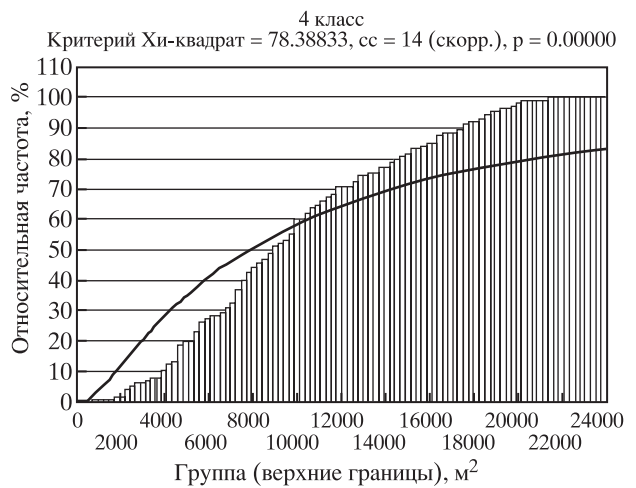
№ участка	I				II				III	IV			
№ класса	3	4	5	6	1	7	8	9	2	10	11	12	
Площадь района, га	1308	342	275	206	221	96.8	147	301	188	84.0	505	254	
		2 129.8				669.3			187.9		842.7		
Абсолютная высота (средняя), м	1349.0	1419.7	1236.0	1528.8	1733.5	1644.4	1727.2	1492.7	1612.9	1049.0	1552.8	2019.8	
		1 364.0				1 623.9			1 612.9		1 643.0		
Перепад высот, м	364.3	173.2	113.4	195.7	331.0	198.8	176.3	406.4	196.6	263.3	704.1	560.0	
		459.9				580.6			196.6		1 387.4		
Средняя крутизна склонов (ОПФ), градусы	5.386	5.099	4.068	6.875	8.537	7.964	5.644	5.672	7.563	16.558	12.892	18.392	
		5.329				7.850			7.563		14.897		
Площадь водосбора, га	617.8	212.1	705.6	60.7	29.1	20.7	41.3	212.7	224.6	234.0	369.6	63.5	
максимальная		705.6				212.7			224.6		369.6		
средняя	0.30	0.36	0.84	0.097	0.067	0.071	0.095	0.43	0.17	0.53	0.39	0.14	
		0.35				0.24			0.17		0.33		

**Таблица 3.** Морфометрические характеристики карстовых форм по классам

№ участка	I				II				III	IV		
№ класса	3	4	5	6	1	7	8	9	2	10	11	12
Количество, шт.	366	113	31	131	20	27	120	93	50	25	268	28
Поражённость карстом, %	23.1	32.4	2.2	41.0	1.1	10.8	16.3	14.0	2.8	11.3	34.5	2.4
Средняя глубина, м	15.8	17.0	6.55	13.6	8.37	13.1	9.02	15.5	5.65	20.3	25.9	15.9
Средняя крутизна стенок, градусы	11.6	11.5	10.8	10.8	15.4	16.2	14.8	16.7	12.3	20.7	20.1	20.5
Средняя площадь, га	0.83	0.98	0.19	0.64	0.12	0.39	0.20	0.45	0.105	0.38	0.65	0.22
Средний периметр, м	333.9	361.9	165.7	294.2	125.4	212.8	159.1	236.4	112.6	217.6	278.3	168.5
Средняя извилистость границ	1.076	1.086	1.050	1.081	1.033	1.039	1.044	1.052	1.032	1.055	1.055	1.052
Средняя площадь водосбора, га	0.84	0.58	0.90	0.11	0.081	0.080	0.19	1.35	0.12	1.16	0.50	0.28

Результаты анализа позволяют сделать вывод о соответствии данных канонической модели ландшафтного рисунка в пределах возвышенных субгоризонтальных поверхностей со слабым и умеренным расчленением мезорельефа. На территории выявлено 3 подобных класса: 6-й, 8-й и 11-й. Для них характерна высокая закарстованность, отсутствие выраженных пространственных закономерностей в распределении карстовых понижений (наличие групп карстовых форм различной конфигурации или их организации вдоль линейных структур). Для 4-го и 9-го классов соответствия распределений площадей логнормальному не отмечено, наблюдалась частичная (4-й класс) или полная (9-й класс) группировка карстовых понижений вдоль линейных понижений рельефа (см. рис. 5).

Анализ расстояния до ближайшего понижения показал несоответствие теоретически предсказанному распределению Рэлея для всех классов (см. рис. 7). Предполагая искажения, внесенные в измерения размерами карстовых понижений, препятствующими их слишком близкому сближению, проверено соответствие распределения этого параметра усеченному распределению Рэлея с отсечением значений ниже среднего диаметра карстовой формы (понижения, расположенные на меньшем расстоянии друг от друга, игнорировались). В результате для одного из классов, соответствующего канонической модели по распределению площадей карстовых понижений (6-го), доказано соответствие распределения расстояний между соседними карстовыми формами усеченному распределению Рэлея (табл. 4).



**Рис. 8.** Проверка соответствия распределения площадей карстовых понижений логнормальному распределению (по классам).

**Рис. 9.** Проверка соответствия распределения минимальных расстояний между соседними карстовыми понижениями 6-го класса статистическим распределениям: *a* – нормальному, *б* – Рэлея, *в* – усеченному Рэлея.

**Таблица 4.** Соответствие параметров ландшафтного рисунка плато Лаго-наки различным статистическим распределениям

Исследуемый параметр	Вид распределения	Подтверждение гипотезы на уровне значимости 0.95 (по классам)				
		4	6	8	9	11
Площадь Расстояние до ближайшего соседнего понижения	Логнормальное	–	+	+	–	+
	Нормальное	+	+	–	–	+
	Логнормальное	+	–	–	+	–
	Рэля	–	–	–	–	–
	Усеченное Рэля	–	+	–	–	–

Как видно из табл. 4, полного соответствия распределений параметров ландшафтного рисунка плато Лаго-наки канонической модели не наблюдалось ни в одном из выбранных классов. При этом отклонения от канонической модели оказались различными в разных классах.

Большую согласованность с моделью продемонстрировали классы, в которых не отмечено выраженной неоднородности в пространственном распределении воронок: 6-й, 8-й и 11-й. Распределение площадей воронок в этих 3-х классах соответствует логнормальному на уровне значимости 0.95. Распределение расстояний до ближайшей воронки оказалось отличным от распределения Рэля. В 6-м классе доказано его сходство с усеченным распределением Рэля на расстояниях свыше среднего диаметра карстовых понижений данного класса. Классы с хорошо выраженными линеаменами – зонами наиболее активного развития карста, полностью не соответствуют канонической модели.

Интересная особенность ландшафтного рисунка плато, заслуживающая дальнейшего исследования, – соответствие распределения расстояний от карстового понижения до ближайшего к нему соседнего нормальному или логнормальному закону в четырех из пяти классов. По всей видимости, это указывает на взаимообусловленность возникновения и роста карстовых понижений при полном покрытии территории их водосборами.

## ВЫВОДЫ

1. На основе данных лазерного сканирования возможно получение ЦМР залесенных территорий с величиной пикселя от 20 см и выше. ЦМР с величиной пикселя 2 м – оптимальна по скорости обработки при сохранении информации о карстовом рельефе. В отличие от данных аэрофотосъемки, залесенность территории не оказывает воздействия на точность ЦМР и дешифрирования пораженности территории карстовыми процессами.

2. Точность дешифрирования поверхностных карстовых форм рельефа значительно выше для ЦМР, построенной по данным LIDAR, чем при использовании АФС, даже высокого пространственного разрешения.

3. На участках однородного расположения карстовых понижений установлено соответствие распределения площадей карстовых форм логнормальному распределению, что соответствует канонической модели математической морфологии ландшафтов. Для участков с частичной или полной приуроченностью карстовых форм рельефа к тальвегам рельефа установлено несоответствие распределения площадей логнормальному распределению.

4. Для участков с однородным распределением карстовых форм местами встречается соответствие данного распределения усеченному распределению Рэля. В остальных случаях распределение минимальных расстояний между соседними карстовыми понижениями не соответствует теоретически предсказанному распределению Рэля.

*Работа была выполнена при поддержке гранта РНФ 14-17-00357.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов А.В. Влияние плотности точек воздушного лазерного сканирования на точность создания цифровой модели рельефа местности // Матер. конф. Интерэкспо Гео-Сибирь, 2010. Т. 4. № 1. С. 18–23.
2. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
3. Демьянов В.В., Каневский М.Ф., Савельева Е.А. и др. Кригинг и базовые модели геостатистики. М.: ВИНТИ, 1999. 13 с.
4. Исаченко А.Г. Ландшафты СССР. Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. 320 с.
5. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса. Учеб. пос. 2-е изд.,

- перераб. и доп. М.: Геолидар, Геокосмос; Красноярск: Институт леса им. В.М. Сукачева РАН, 2007. 230 с.
6. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200 000 (1:100 000–1:500 000). М.: Недра, 1978. 391 с.
7. Ревзон А.Л. Методика анализа материалов аэрофотосъемки для оценки современной активности карстовых и оползневых процессов // Геоморфология. 1975. № 3. С. 36–41.
8. Remote Sensing Image Analysis: Including The Spatial Domain. Edited by S.M. de Jong, F. D. Van Der Meer. Kluwer Academic, 2004. 359 p.
9. Federal Office of Topography Swisstopo// [http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/products/height/dom\\_dtm-av.html](http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/products/height/dom_dtm-av.html)

## INVESTIGATION OF KARST RELIEF IN THE EASTERN PART OF LAGO-NAKI PLATEAU BY LIDAR AND HIGH-RESOLUTION AIRBORN IMAGES

**T. V. Orlov, S. A. Sadkov**

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,  
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: dist@geoenv.ru*

Light Detection and Ranging scanner (LIDAR) provides precise information about current state of relief even for densely forested areas. Ground surface point clouds were used to create raster digital elevation models (DEM) of two study areas at Lago-Naki plateau (Krasnodar krai and Republic of Adygea, Russia). Karst depression patterns were investigated using DEM based on LIDAR data and airborne images analyzed by means of open software. SAGA GIS was used for rasterizing LIDAR data and calculating morphometric indices. Image J software was used for Fourier transformation and two-dimensional band-pass filter functions. The current state of karst relief patterns was explored by methods of mathematical morphology of landscapes.

**Keywords:** *karst, LIDAR, digital elevation model, relief morphometry, mathematical morphology of landscapes, Image J.*