

---

---

УДК 551.4.012

## НОВЫЕ ЗАДАЧИ МОРФОМЕТРИИ РЕЛЬЕФА И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ КЛАССИФИКАЦИИ В ГЕОМОРФОЛОГИИ

© 2020 г. С. В. Харченко<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт географии РАН, Москва, Россия*

*\*E-mail: xar4enkoff@yandex.ru*

Поступила в редакцию 05.05.2019 г.

После доработки 01.07.2019 г.

Принята к публикации 08.10.2019 г.

Несмотря на бурное развитие вычислительных технологий и методов, рост числа статей с применением морфометрического анализа рельефа, в этой ветви геоморфологии давно не выходило обобщений. В особенно остром виде эта проблема заметна в “русскоязычной” печати. Морфометрия рельефа иногда стала рассматриваться как полумаргинальная дисциплина, не имеющая особенной ценности в задачах познания рельефа. В статье рассматривается перечень основных препятствий для развития содержательного морфометрического анализа: геоморфологическая конвергенция и гомология, неинтерпретируемость сложных формальных моделей, слабая репрезентативность распространенных метрик для автоматизированного проведения геоморфологических границ и т.д. Намечены возможные пути решения этих проблем на пути к морфо-хроно-генетическому картографированию рельефа по ЦМР. Дан краткий обзор некоторых примеров кластеризации, классификации с обучением, распознавания визуальных образов, выработки и использования нетипичных морфометрических характеристик. Статья призывает геоморфологов активизировать усилия, а по возможности и возглавить изыскания по этим четырем методическим направлениям, чтобы предотвратить продолжающееся расслоение собственно геоморфологии и морфометрии рельефа.

*Ключевые слова:* морфометрия рельефа, статистические модели, кластеризация, классификация, распознавание образов

DOI: 10.31857/S043542812001006X

### ВВЕДЕНИЕ

Эта статья задумана автором в качестве, своего рода, призыва к ревизии состояния морфометрии рельефа, по крайней мере, в отечественной геоморфологии. Относительная замкнутость некоторых российских геоморфологических научных школ и отдельных коллективов приводит к тому, что информация о передовых достижениях, особенно получаемых на другом конце света (и публикуемых не на русском языке), либо вовсе не доходит до потенциальных пользователей, либо доходит в самом общем виде и не реализуется в практической работе геоморфологов.

Говоря о применении морфометрического анализа и математических методов в геоморфологии, нельзя не вспомнить обобщение О.А. Борсука и И.И. Спасской [1], изданное под эгидой ВИНТИ, когда ими были сведены воедино передовые результаты в этой области знаний. Однако с момента ее опубликования прошло 45 лет, и подобных обобщений на русском языке больше не выходило. Огромный вклад в раз-

работку теории морфометрии рельефа внесен Ю.Г. Симоновым, им же, помимо множества статей, опубликована монография по результатам защиты докторской диссертации [2], и гораздо позже – два учебных пособия [3, 4]. Тем не менее эти работы не могут претендовать на сводку знаний по передовым достижениям в морфометрии рельефа на момент издания. Работы Ю.Г. Симонова скорее дают необходимый базис для дальнейшего углубления своих знаний.

Свое направление в морфометрическом анализе разработал А.Н. Ласточкин (называя его “морфодинамический анализ”) [5, 6]. Его работы базируются на двух предпосылках: 1) реализация рельефообразующего процесса находит яркое выражение в морфологии рельефа земной поверхности (ЗП), изучение его должно быть основано на выделении элементов поверхности – характерных точек, структурных линий и заключенных между ними поверхностей, 2) опора на геометрическую структуру земной поверхности может обеспечить системный подход при изучении практически любого компонента географического ландшафта.

За рубежом периодически выходят системные обобщения теории морфометрии с учетом новых публикаций. Последняя крупная работа издана девять лет назад [7], хотя выдающиеся, до сих пор, в каком-то смысле, непревзойденные монографии по теме были изданы еще в начале 1970-х годов [8, 9]. Еще раньше выходит первое издание книги австрийского геолога А. Шайдеггера [10], затем – классическая работа У. Крамбейна и Ф. Грейбилла [11]. Безусловно, полезна геоморфологам будет и свежая монография нашего соотечественника И.В. Флоринского [12], где автор фокусирует внимание на решении проблем почвоведения и геологии методами морфометрического анализа.

Тем не менее здесь акцентируем внимание не столько на истории морфометрии рельефа (иначе следовало бы говорить о трудах П.К. Соболевского, А.С. Девдариани, Р. Хортон, А.Н. Стралера, Р.Дж. Чорли и других основоположников научного направления), сколько на том, как давно не обновлялась и не обсуждалась в широком кругу “матрица” методов и подходов, применяемых при решении морфометрических задач. Такое обсуждение подвело бы очередную (после большого перерыва) черту в вопросе: что могут дать геоморфологу передовые достижения морфометрического анализа рельефа сегодня?

Пищу для размышлений автор статьи получил при участии в Пленумах Геоморфологической комиссии РАН, Шукинских чтениях, обсуждении результатов студенческих работ в ходе учебного процесса на кафедре геоморфологии и палеогеографии МГУ, заочном “общении” с рецензентами статей и экспертами фондов. Геоморфологи, не занимающиеся непосредственно специализированными математическими методами в изучении рельефа, если и используют эти методы – то чаще всего на уровне развития морфометрии рельефа на момент последнего доступного обобщения (повторимся, в России это книги конца 1990-х годов, за рубежом – десятилетней давности). Отчасти данный негативный эффект нивелируется широким распространением геоинформационных технологий. Реализованные в них инструменты анализа морфологии рельефа, по причине доступности для всех желающих, были легко восприняты профильным сообществом (не менее важная причина – доступность глобальных и региональных цифровых моделей рельефа [13]).

В это же время именно в последние 10–20 лет произошел фантастический прогресс в развитии вычислительной техники и еще больше – конкретных прикладных методов анализа данных. Вследствие этого некоторые канонические подходы в морфометрии – “делать надо именно так, а не иначе” – частично утратили свою актуальность.

## ПРОБЛЕМЫ

В этой работе мы хотим обсудить некоторые существующие в умах ограничения морфометрических методов изучения рельефа и показать (к сожалению, скупо в рам-

ках одной только статьи) примеры успешного приложения современных математических методов в геоморфологии. Наука о рельефе, в этом смысле, не отличается от остальной географии (но, кстати, отличается от геологии) — вспышки роста числа статей с применением математических методов сменялись относительным отсутствием интереса к ним, когда выяснялось, что математика (да и морфометрия рельефа) не может ответить на все вопросы. Классик науки о рельефе С.С. Воскресенский в 1968 г. писал, что “геоморфология изучает формы поверхности земной коры. Но изучает, конечно, не их геометрию” [14]. Еще раньше Э. Мартонн высказывался более категорично: “морфометрия не является наукой о рельефе. Средними величинами уничтожаются контрасты и наиболее характерные детали, влияние которых на другие географические явления заслуживает самого пристального внимания” [15, с. 25]. Доступные на тот момент данные о распределении высот (в основном, топографические карты) и средства обработки этих данных не позволяли ставить сколько-нибудь сложные расчетные морфометрические задачи, а расчет, скажем, средней высоты перевалов в горной системе не мог иметь существенной содержательной ценности.

Выполняемые расчеты, например, для построения поверхностей линейного и квадратического трендов рельефа (для структурно-геологических и поисково-геоморфологических целей) по регулярным сеткам высот размерами не более  $10 \times 10$  ячеек, отнимали два часа у владеющего методом специалиста [16]. К слову, сейчас продолжительность таких расчетов уменьшилась в десятки и сотни тысяч раз, разумеется, речь здесь идет про собственно расчетную часть задачи. Огромные трудозатраты на работу даже с небольшими цифровыми массивами стимулировали геоморфологов крайне тщательно подходить к выбору того, “а что, собственно, анализировать”.

Устоялся понятный, но ограничивающий научный поиск, подход — необходимо сначала выделить геоморфологические объекты опытным глазом эксперта, а затем “снимать” с карты (позднее с цифровых моделей рельефа, далее — ЦМР) их морфометрические характеристики и вести какой-то анализ. Этот подход хорошо прижился, отчасти и потому, что вписывался в концепцию “дискретной геоморфологии”. Сама эта концепция, очевидно, непротиворечива — отдельные формы рельефа развиваются в четких пространственных и временных границах. В то же время положение этих границ не всегда удается четко определить, а уж корректно рассчитывать какие-то морфометрические параметры и коэффициенты в нечетко определенных границах еще труднее. Не лучше ли пытаться адаптировать эти параметры и коэффициенты для определения положения самих границ?

Как следствие, в геоморфологии очень редко используется разведочный анализ данных, как раз направленный на установление их структуры (например, группировки объектов в неизвестное заранее число классов). Имеется скепсис в отношении использования “огульных”, заранее не структурированных данных. Скептикам хочется возразить. Еще в 1961 г. классиками отечественной научной фантастики братьями Стругацкими в рассказе [17] описывался “коллектор рассеянной информации”, электронная система для обработки следов любых событий, реконструкции и прогноза. А уже сейчас, с развитием искусственных нейронных сетей (да и других методов машинного обучения), все менее значимым становится подход с превентивным выделением объектов.

В 1980-х годах в когнитивных науках и кибернетике возникло понятие “коннекционизм”, который в наиболее общем виде формулируется так: “нужно не пытаться задавать аксиоматические формальные системы для последующих рассуждений в них, а строить большие ансамбли параллельно работающих нейронов, которые, подобно человеческому мозгу, как-нибудь сами разберутся, что им делать” [18]. Это высказывание, хотя и наполовину шуточное, отражает современные тенденции многомерной статистики и статистического моделирования.

В конечном счете, любое описание объекта, которое специалист-геоморфолог может формально задать — сможет воспроизвести и вычислительная машина. А с развитием баз геологических и геоморфологических данных и дальнейшим совершенствованием методов их анализа (созданием эталонов, реестров и кадастров форм и элементов рельефа), возможно, в единичном описании/геоморфологической интерпретации топографической карты — машина и превзойдет человека. Это кажется сомнительным и вызывает удивление, однако, уже сейчас можно найти публикации, где с помощью компьютерного зрения машина узнает в лицо человека быстрее и с сопоставимой [19] или даже лучшей [20] точностью, нежели другой человек. Или где ЭВМ быстрее и точнее ориентируется в дорожной обстановке, чем водитель средней квалификации [21]. Разумеется, нетрудно отыскать и обратные примеры не столь удачных моделей и алгоритмов, однако, неуклонный прогресс в данной области налицо.

Сформулируем здесь перечень (наверняка, не полный) методических и методологических ограничений, тормозящих сегодня развитие морфометрии рельефа в структуре геоморфологии.

**1. Затяжная дискуссия о попытках “абсолютизации” морфометрического метода в геоморфологии.** Никто из профильных специалистов не отрицает за морфометрическими методами роль вспомогательных при решении геоморфологических задач. Однако при попытках суждений по одним только морфологическим индикаторам о генезисе и возрасте форм чаще всего выдвигается следующий общий (основанный на ряде частных) контраргумент — морфология не позволяет гарантированно идентифицировать и охарактеризовать форму рельефа по трем или четырем (добавляется динамика формы) ее аспектам. Этот аргумент со стороны критиков математизации геоморфологии полностью справедлив, вот только мало кто и пытался с ним спорить. В конце концов, только с помощью морфометрических методов можно пытаться судить о рельефе территории с какой-то не стопроцентной степенью надежности, и эту степень можно оценить с помощью специально созданных наборов эталонов. Суждение с известной надежностью уже не кажется ненаучным гаданием. Вероятностное предсказание о характере рельефа — одно из перспективных направлений морфометрии.

Результат вероятностного предсказания может быть базой для формулирования гипотез и эффективного планирования полевого исследования, направленного четко на их проверку. В конце концов, даже наличие скважин, разрезов, результатов анализа полевых образцов не гарантирует однозначную идентификацию формы, и история геоморфологии знает тому немало примеров. Было бы заблуждением считать, что использование классических подходов, скажем, к геоморфологическому районированию более надежно, чем использование формально-математических индикаторов границ районов даже в рамках вероятностного подхода. Профессор С.С. Воскресенский, возглавивший коллектив авторов книги “Геоморфологическое районирование СССР и прилегающих морей” [22], описывал принципы выделения таксонов рельефа, среди которых был “принцип изменчивости сопряжения регионов или принцип различного характера границ”. Он предполагает, что даже на одном и том же уровне деления не всегда можно четко провести линейную границу между элементарными регионами и, возможно, где-то корректнее в качестве границы использовать полосу той или иной ширины (в зависимости от того, как соотносятся в пространстве характерные геоморфологические признаки соседних регионов).

Очевидно, что морфометрия рельефа никогда не решит все проблемы геоморфологии (в частности, картографирования), в то же время ясно, что потенциал ее в решении этих проблем выработан лишь в малой мере. А при затяжной недооценке успехов математики, появления новых методов и источников данных для морфометрических построений, нереализованная часть потенциала разве что становится еще больше — дальше отодвигается горизонт возможностей.

**2. Геоморфологический полиморфизм и конвергенция.** Один из частных контраргументов, “китайская стена” на пути внедрения методов автоматизированного картографирования рельефа по ЦМР: явления геоморфологического полиморфизма и еще более – конвергенции [23–25]. Конвергентными называют формы, морфологически подобные, но отличные по генезису и/или возрасту. Действительно, прямое сопоставление двух форм, имеющих однородные планово-высотные очертания, но отличающихся, скажем, ведущим сформировавшим их процессом, не позволит выявить эти генетические различия. Настоящей проблемой конвергенция форм была на этапе расцвета описательной геоморфологии – очевидно, соблазн искать одинаковую хроногенетическую трактовку визуально похожим формам может быть велик.

Как ни парадоксально, именно с распространением открытых ЦМР, высокоточного съемочного оборудования (беспилотные летательные аппараты, наземное лазерное сканирование и т.д.), методов многомерного анализа данных, проблема геоморфологической конвергенции постепенно ослабевает. Потенциальное окончательное решение ее основано на следующих подходах. Во-первых, это учет геоморфологической позиции самой формы, ее парагенезиса (или, по смыслу, ее “геоморфологического контекста”). Простая аналогия: в языке существуют многозначные слова, понимание значения которых в каждом конкретном случае не возможно без учета контекста. Также и морфологически подобные формы рельефа: если они сформированы разными процессами, то возможно будут иметь разный характер морфологии рельефа окружения? Во-вторых, это внимание к осложняющим формам низших рангов вплоть до нанорельефа. Именно здесь на помощь могут прийти сверхдетальные способы съемки земной поверхности. В-третьих, это учет ландшафтно-климатических особенностей территории, как минимум, современных. Очевидно, что два объекта, выглядящие как активные овраги, но сформированные один – в центре Европейской части России, а другой – на дневной поверхности гранито-гнейсов в пустынях центра Австралии, имеют разное происхождение. Так или иначе, генеральное направление при решении этой проблемы – учет других морфометрических и иных индикаторов, помимо морфологии самой формы.

**3. Низкая показательность каждой отдельной морфометрической величины для геоморфологической интерпретации и трудность комбинированного анализа большого числа метрик.** Встречается позиция, что показательность морфометрических характеристик рельефа очень ограничена. И действительно, учитывая сложность рельефообразующего процесса, полигенетический характер многих форм, могут ли параметры высоты, крутизны, экспозиции и др. сообщить исследователю сколько-нибудь полную информацию о форме? При этом забывается, что на текущий момент создана масса частных метрик и коэффициентов для решения частных же задач. В русскоязычной литературе обзоры существующих метрик произведены 30–35 лет назад А.М. Берлянттом [26], А.Н. Ласточкиным [27–29] и др. Высказывались и высказываются мнения, что стоит перевести внимание с разработки новых коэффициентов к содержательной интерпретации уже существующих, что незначем заполнять таблицы с десятками переменных, так как их осмысленный комбинированный анализ перестает быть возможен.

Однако сейчас выработка новых геоморфологических коэффициентов, характеризующих каждый очередную тонкую черту морфологии, при повсеместном внедрении методов снижения размерности и методов многомерной классификации, перестает создавать какие бы то ни было затруднения. В крайнем случае, можно довериться опыту внедрения методов классификации по многомерным данным в других областях науки.

Сегодня общепризнано, что предиктивные статистические модели, позволяющие предсказывать принадлежность объекта к классу, могут быть интерпретируемыми или не интерпретируемыми [30]. Первые – относительно простые, опираются на неболь-

шой набор предикторов, обычно не требуют предобработки данных и легко записываются в виде уравнения. Анализируя такую модель, всегда можно сказать, что объекты из класса А имеют какие-то характерные значения вводных параметров, а объекты из класса Б – имеют другие значения этих же параметров. В идеальном случае облака объектов разных классов – точки в координатном пространстве признаков – не пересекаются между собой. Например, уже только по абсолютным высотам хорошо разделены нивально-гляциальные формы и формы морской абразии в низких широтах. Это только тривиальный пример, и, в случае построения реальной модели, требуется набрать больше разноплановых предикторов для сколько-нибудь уверенной автоматической идентификации форм рельефа.

Вторые – не интерпретируемые, когда для создания модели используются десятки и сотни входных переменных, оценивается не только их влияние на результат (класс объекта), но и влияние взаимодействия всех возможных комбинаций предикторов между собой. Математические уравнения, отражающие сущность таких моделей, также могут быть записаны – но для записи каждого уравнения потребуются десятки страниц текста. Очевидно, что их содержательная интерпретация мало возможна – человеческий мозг не в состоянии одновременно удержать в голове такие сложные формально-логические конструкции.

**4. Скептицизм в отношении не интерпретируемых математических моделей.** Закономерен контраргумент – можно ли доверять моделям, адекватность которых нельзя оценить напряжением ума? Думается, любые сложные модели, опирающиеся на длинный перечень входных данных и клубок связей между ними, можно оценивать на адекватность действительности путем тестирования их на геоморфологических объектах, принадлежность к классам которых заранее определена. Этот подход не нов и является основой всех методов распознавания образов с обучением. Необходимо создавать тестовые наборы данных, банки геоморфологической информации, которые бы позволили обучать и проверять на надежность такие сложные математические конструкции. У подобных моделей существует другая проблема – переобучение или “overfitting” [30], однако, способы ее решения уже существуют.

**5. Недооценка возможностей использования параметров статистических распределений морфометрических величин как самостоятельных метрик.** Одним из подходов к усилению предсказательной силы моделей классификации является использование в качестве входных данных не отдельных пикселей матриц высот, уклонов, кривизн и т.д., а статистик их распределения в срезе каких-то более крупных, нежели пиксели, площадных единиц. Попытки введения подобного подхода практиковались уже давно – в середине 60-х годов прошлого века И.П. Шараповым предлагалась [31] типология рельефа на основе сходств и отличий в распределении абсолютных высот. Участки с одинаковой гистограммой распределения относились автором к одному типу. Такие построения справедливо критиковались и, к сожалению, были почти похоронены, так как легко нашлись участки ЗП со сходными гистограммами высоты, но разным и генетически, и даже визуально рельефом. Сегодня решение данной проблемы кажется очевидным – нужно анализировать параметры распределения не одной только абсолютной высоты, но большего числа характеристик.

Для иллюстрации того, что увеличение числа вводных переменных позволяет надежнее определять хроно-генетическую принадлежность рельефа территории, проведем мысленный эксперимент. Если взять какую-то регулярную матрицу высот и случайным образом перетасовать в ней строки и столбцы, а затем оценить распределение высот по гистограмме – оно окажется неизменным. Вместе с тем “спокойный” равнинный рельеф при такой тасовке (даже прямой пологий склон), скорее всего, превратится в хаотичное поле отметок высоты, с резкими перепадами от ячейки к ячейке и соответственно большой средней крутизной поверхности, задаваемой этой матрицей. В природе не так много реальных аналогов подобного пространственного распре-

деления высот — например, сильно расчлененный карстовый рельеф в заповеднике Цинжи-дю-Бемараха на Мадагаскаре.

Однако уже гистограммы распределения уклонов будут кардинально отличаться (и отличать участки между собой). И именно комбинация двух распределений, а не каждое из них в отдельности, позволяет группировать хотя бы визуально схожие геоморфологические ландшафты. Ведь при одинаковой форме гистограммы высот именно гистограмма встречаемых уклонов поверхности жестко определяет, сколь сильно могут отличаться высоты в соседних ячейках регулярной матрицы. Если уклоны невелики — то “хаотичного” поля высот с модально резкими скачками отметок быть не может.

**6. Невозможность учета характера топографического рисунка при использовании общеизвестных базовых морфометрических величин.** Комбинации параметров распределений морфометрических величин — высоты, уклонов, любых других — позволяют установить разве что общее сходство визуального облика рельефа двух и более участков, но не конкретные черты их топографического рисунка, которые могут быть принципиально важны для определения генезиса участка поверхности. Эта проблема известна, однако, решается тоже относительно просто.

Чаще всего геоморфологу приходится работать с т.н. локальными морфометрическими характеристиками рельефа, определенными “в точке” (но не всегда в ней определяемыми). Очевидно, что если твердая земная поверхность — непрерывна, то в каждой точке можно определить минимум одну ее высотную отметку. Также в каждой точке теоретически определен и уклон поверхности. Однако доступные нам измерители позволяют получать эту информацию с конечной детальностью. К примеру, для определения уклона в точке на регулярной модели высот всеми распространенными сегодня и встроенными в ГИС способами требуется знание о высотах смежных точек/ячеек.

В дополнение к локальным характеристикам в морфометрии рельефа разрабатываются региональные (зональные [по 32]) показатели, одно значение которого обычно характеризует сразу некую площадь. Пример: амплитуда высот в речном бассейне. Именно в такой формулировке данный показатель характеризует бассейн целиком, и на соответствующих морфометрических картах одним цветом, отвечающим величине амплитуды, будут закрашены и верховья, и приустьевые части бассейна.

Третий тип характеристик — фокальные показатели, рассчитываемые для некой окрестности точки, но относимые к самой точке. Примеры: получившие популярность в последние два десятилетия индексы топографической позиции или ТРІ [33] или разрабатываемые в т.ч. нами спектральные характеристики рельефа [34], отражающие характер периодичности поля высот в окрестности точки. Рассчитываемый для некой территории параметр приписывается одной “точке”/ячейке модели. При изменении радиуса окрестности для расчета — в ячейке меняется значение показателя. За это фокальные метрики иногда критикуются. Однако никто не мешает пользователям данных показателей различать между собой, скажем, ТРІ, рассчитанный по окну с радиусом  $X$  км и  $2X$  км. Достаточно принять, что это параметризуемый показатель, характеризующий морфологию рельефа участка с чуть отличающихся сторон, в разном масштабе рассмотрения. Фокальные метрики характеризуют то, что можно назвать “топографическим рисунком” или “паттерном рельефа” и потому несут новую информацию относительно и локальных, и региональных характеристик.

Большие перспективы в распознавании однородных паттернов рельефа мы отводим методам компьютерного зрения, среди которых бурно развиваются последние два года и уже оставили позади все классические подходы т.н. “сверточные нейронные сети” [35].

Может казаться удивительным, но остается фактом, что из простой модели высот конструируется огромное количество метрик, каждая из которых будет характеризовать рельеф с какой-то специфической стороны. И, возможно, именно какая-то ред-

кая метрика позволит достоверно разделить в пространстве признаков один участок от другого, не разделяемые всеми другими способами.

**7. Что может дать обучение статистической модели воспроизводству уже существующих на геоморфологических картах контуров?** Попытки создания моделей распознавания форм рельефа по эталонам (классификация с обучением) с определением степени близости к каждому из эталонов иногда наталкиваются на непонимание: какой смысл при создании модели опираться на существующие геоморфологические карты, ведь надо строить что-то новое (идти по пути классификации без обучения)?

Практических резонансов здесь два: во-первых, это позволяет построить модель, которую можно с определенным допуском экстраполировать на территории, близкие в ландшафтно-климатическом и структурно-геологическом отношении, но не покрытые геоморфологическим картографированием в соответствующем масштабе. Во-вторых, эта модель не будет полностью воспроизводить конфигурацию геоморфологических границ даже на той территории, по данным для которой она создана. Все несогласованности между экспертно-установленными границами и границами, распознанными моделью, будут объясняться либо не полной надежностью модели (выбранный набор параметров и/или статистический метод не позволили ее достичь), либо ошибками в проведении границ на исходной карте, которые в силу каких-то причин не были замечены при ее создании (например, ошибочно на момент создания карты трактовался генезис рельефа какой-то территории).

И в первом, и во втором случае есть возможность извлечения практической пользы. В первом случае становится ясен перечень конкретных форм рельефа или их типов, которые не распознаются достоверно с текущим набором входных параметров. Пристальное рассмотрение того, что это оказались за формы, и есть ли у них характерные морфологические черты, потенциально вычлняемые каким-то способом из ЦМР — позволит в итоге итеративно улучшать предсказательный потенциал моделей. Во втором случае практический эффект прост — уточнение существующих карт.

Для построения моделей классификации с обучением необходимо создавать реестры морфометрических характеристик по формам рельефа разных рангов и областей развития различных генетических типов форм, оценивать репрезентативность (или, скорее, дискриминационную способность) той или иной метрики для проведения геоморфологических границ автоматическими алгоритмами. Поэтому лучшего первичного эталона, кроме как контуры на существующих геоморфологических картах, пока нет.

Это не полный перечень вопросов, составляющих дискуссию вокруг морфометрического анализа как потенциально ведущего инструмента познания рельефа. Некоторые из описанных возможных подходов требуют длительной (думается, десятки лет) работы и систематизации существующей геоморфологической информации, что, однако, не должно приводить к игнорированию или неприятию попыток сдвинуть состояние проблемы с мертвой точки.

## НОВЫЕ ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА В ГЕОМОРФОЛОГИИ

Рассмотрим здесь несколько типовых примеров применения морфометрического анализа и иных формально-математических методов для решения геоморфологических задач. Обзор разобьем по типу используемых методов: кластеризация (один из подходов к машинному обучению без учителя, т.е. без априорного знания о соотношении классов объектов и их индикаторов), классификация с обучением, методы компьютерного зрения и некоторые иные подходы.

**Кластеризация (классификация без обучения).** Идея использования кластерного анализа в геоморфологии основана на том, что различные формы рельефа и территории



распространения разных его типов хорошо разделимы в пространстве каких-либо признаков. Иногда это действительно оказывается справедливо, особенно при удачном подборе предикторов и корректно проведенной процедуре предобработки данных. При использовании таких наборов предикторов, в которых облака точек объектов разных типов (а принадлежность их нам не известна заранее) в пространстве признаков частично пересекаются, кластеризация даст, как минимум, не идеальный результат. В таком случае говорят, что кластеры линейно неразделимы. Это означает, например, что в пространстве двух признаков объекты двух разных типов нельзя разделить линией, трех признаков – плоскостью, четырех и более признаков – гиперплоскостью. В общем случае это справедливо для большинства методов машинного обучения при построении бинарных моделей, а не только для кластеризации. Тем не менее есть много примеров удачного применения методов кластеризации.

Хорошо известны в отечественном геоморфологическом сообществе работы В.Вад. Бронгулеева, особенно в части выделения границ распространения на территории европейской части России различных т.н. “экзогеодинамических режимов” [36]. Им использовалась иерархическая кластеризация следующего набора входных параметров: “абсолютная высота рельефа, амплитуда неотектонических движений, градиенты этих величин, рассчитанные в тех же ячейках  $20' \times 30'$  по значениям в четырех ближайших соседних ячейках, среднеголетние суммы осадков, среднеголетний слой стока, степень залесенности (в %), число дней в году с температурой выше нуля и плотность активных разломов” [36, с. 12]. Полученные границы кластеров соотнесены автором с картами из [37], установлены сходства и отличия, дана геоморфологическая интерпретация выделенных классов (“режимов”) в связи с ведущим современным геоморфологическим процессом в каждой из ячеек.

Есть и совсем свежие работы, примечательные не только тем, что основаны на методах кластеризации, но и использованием фокальных морфометрических характеристик для учета текстуры расчленения (об этом речь будет вестись и ниже). Так, коллектив французских и бразильских исследователей в своей работе по территории Французской Гвианы [38] использовал комбинированный подход: по SRTM 1" были рассчитаны классические параметры – медианные значения и / или средние арифметические, а также среднеквадратические отклонения абсолютной высоты, ее амплитуды, крутизны, кривизны и др. В дополнение к ним рассчитывались параметры двумерной Фурье-периодограммы при наложении скользящего окна размерами 2,4, 6 и 9 км (для поиска колебаний высоты с разными пространственными частотами), характеризующих текстурные особенности рельефа. Все результаты сводились в таблицу наблюдений, размерность данных затем понижалась с помощью метода главных компонент до 3, по которым в завершение велась кластеризация методом  $k$ -средних. По трем признакам-компонентам выделено 16 хорошо обособляющихся кластеров, которые при качественной интерпретации затем были частично объединены в более общие группы. Сравнение с традиционными геоморфологическими картами этой территории [39, 40] показало весьма хорошую сходимость с результатами кластеризации.

Пример более частной задачи – работа [41], в которой авторы по всей длине береговой линии графства Суффолк (юго-восток Англии) провели кластерный анализ “поведения” береговой линии в периоды 1881–2015 и 1990–2015 гг. Входными переменными для анализа стали величины сдвига береговой линии (либо за счет размыва пляжевых наносов и абразии клифов, либо за счет аккумуляции наносов) в разные временные интервалы по 733 трансектам на протяжении 74 км. По итогам составлены схемы тенденций развития берега (типов “поведения”) в двух временных масштабах: полтора столетия и четверть столетия, объективно выделены участки берега со сходным характером развития.

**Классификация с обучением.** Не совсем новые, но, тем не менее, почти не используются в геоморфологии традиционные методы классификации с обучением. В то же

время, в прикладных ветвях геологии эти подходы более востребованы [42], несмотря на пресловутую сложность для формализации объекта исследований. Наиболее частый, пожалуй, пример применения этих методов – предсказание “оползневой восприимчивости” территории (калька с англ. “landslide susceptibility”). В таких задачах требуется по данным имеющейся инвентаризации оползней создать бинарную (скорее оползневой участок или скорее безопасный участок) статистическую модель, которую можно было бы переносить на близкие в отношении природных условий территории.

Совсем недавно вышел прекрасный обзор состояния проблемы [43], где проанализированы 565 статей, изданных с 1983 по 2016 г. Все обзореваемые работы проведены в общей сумме на 621 участке, из них на территории России (11% суши) – ни одного. Отчасти это объясняется тем, что в обзор не попали (крайне немногочисленные) работы на русском языке, но, думается, в существенно большей степени потому, что исследования подобной направленности редки в отечественной геоморфологии, да и инженерной геологии.

В этом же обзоре приводятся характеристики частот использования различных методов: в тройке лидеров логистическая регрессия, оверлейный анализ (а именно метод частотного соотношения/frequency ratio), искусственные нейронные сети с обучением. Также любопытно, что интерес к одному из самых ранних методов, применяемых для подобных задач – линейному дискриминантному анализу, сохраняется уже на протяжении трех десятилетий.

Эффективность предсказания (статистическое понятие “efficiency”, часто оценивается критерием точности или “accuracy”) в различных публикациях сильно колеблется, чаще всего встречаются значения от 60 до 90%. Значение в 60%, кажется, находится на грани случайного угадывания, однако, это не так. Нужно понимать, что в типовых ситуациях в тестовых наборах данных оползневые “наблюдения” составляют малую часть от общего их числа. Скажем, если 10% площади какой-то территории подверглась воздействию оползневых процессов, то при случайном назначении классов “оползневой участок”/“безопасный участок” удастся распознать истинный оползень также в одном случае из десяти, а эффективность 60% – относительно неплохой показатель.

Другой пример классификации с обучением – использование комбинированной техники распознавания пролювиальных конусов выноса (для бассейна оз. Уурэг-Нуур в Монгольском Алтае) – демонстрирует статья [44]. Авторами обучена модель на наборе данных всего из одиннадцати оконтуренных вручную конусов. Тренировочные наборы таких размеров – сейчас почти не применяются, все чаще можно встретить обзоры моделей, построенных на наборах вплоть до сотен тысяч объектов. Однако в географии создание таких наборов затруднительно, но результаты из [44] внушают большие надежды. Использованный в этой работе подход состоит в установлении характерных морфометрических черт для выделенных вручную пролювиальных шлейфов (в т.ч. таких редких, специфичных метрик, как степень подобия формы в плане сектору круга и т.д.), расчете их по движущемуся окну (mean-shift segmentation), а затем применении метода опорных векторов для собственно классифицирования.

Интересная сравнительная работа по классифицированию территории по критерию подверженности овражной эрозии проведена в Иране [45]. Для водосборов рек Кашкан и Польш-э-Дохтар на западе страны не только были построены соответствующие карты, но и с помощью тестовых наборов оценена эффективность 4 различных методов (вместе с их модификациями – всего 7 методик): SVM (метод опорных векторов с ядрами 4 различных видов), BRT (регрессионные деревья), BP-ANN (нейронные сети обратного распространения ошибки), RF (случайный лес). Несмотря на то что наилучший результат дало применение последнего метода, интересно само по себе тестирование метода опорных векторов с различными ядрами. В простейшем (линей-

ном) случае этот метод “пытается” разделить весь диапазон значений какой-то переменной по принадлежности к классам. Допустим, пиксели ЦМР с низкой площадью водосбора относятся к потенциально не овражным, а начиная с какой-то величины площади – потенциально или реально овражным. При использовании радиального ядра могут быть учтены более сложные закономерности, например, в случае, если с дальнейшим ростом переменной величины снова начинает преобладать (в частотном отношении) первый из классов объектов, здесь – не овражный. И действительно, применение радиального ядра дает прирост точности в 10% или 8 п.п. (92.2% против 84.4%), что достигается за счет одной только смены ядра при том же самом используемом методе и входных переменных.

**Распознавание визуальных образов и текстурный анализ.** Думается, большие перспективы есть у двух названных в подзаголовке подходов, что связано с уже упомянутыми выше ограниченными возможностями использования локальных морфометрических характеристик для распознавания форм рельефа. Интересны работы по распознаванию визуальных образов и паттернов в рельефе, которые ведутся Т. Степински с коллегами. Этой группой разработан метод т.н. “геоморфонов” [46]. Алгоритм классифицирования элементов земной поверхности методом геоморфонов встроен в ГИС GRASS. Основа метода – кодирование высотных отметок в окрестности целевой точки. На выбранном удалении от нее по восьми основным румбам определяется относительная высота, соответственно, восьми других точек. Относительная высота в качественном (кодифицированном) смысле может принимать три значения: выше, ниже или равно. Порядок расположения этих кодов определяет морфологическую позицию центральной точки и позволяет относить ее к одному из десяти возможных структурных элементов на земной поверхности (седловины, гребни, долины и т.д.). Расчеты могут производиться на разных расстояниях для выявления структурных элементов рельефа разного масштаба. Интересно, что очень похожий способ описания рельефа предлагался советским ученым В.Л. Грейсухом [47], однако развития почему-то не нашел.

На ведущую позицию среди методов компьютерного зрения сейчас вышли глубокие сверточные нейронные сети (СНС или CNN). Они основаны на скользящем расчете различных характеристик свертки частей изображения, при этом функции свертки могут быть самыми разными, начиная с двумерного дискретного преобразования Фурье одноканальных растровых изображений, к которым относятся и регулярные цифровые модели рельефа. Пример – работа [48], где авторы провели автоматический поиск кратеров на лунной поверхности с расчетом вероятности (надежности) отнесения объекта к типу “кратер”. Совсем недавно опубликована статья [49], где авторы по спутниковым изображениям в видимом диапазоне частот выделяли восемь различных типов природных объектов, включая формы рельефа: речные русла как таковые и участки меандрирующих русел, озерные котловины, вулканические конусы, отдельно расположенные холмы, кратеры и т.д. Наихудшая точность идентификации оказалась, как ни странно, у кратеров (0.82) и вулканических конусов (0.87), что, очевидно, весьма не плохо. Надежность выделения объектов остальных типов превысила 0.9. Используют сверточные нейронные сети и для сегментации изображений, например, для геологического картографирования [50]. В этой работе по данным Canadian Digital Elevation Data (CDED) и ArcticDEM, данным аэрофотосъемки и временного ряда снимков Landsat проводится попытка построить карту типов грунтов на дневной поверхности. Референсные данные для обучения модели – созданные недавно классическим способом геологические карты [51]. Авторами численно не была оценена схожесть результатов, однако, визуальные оценки позволяют говорить о высокой ее степени.

Регулярно появляются работы, связанные с распознаванием граней и границ на двумерных изображениях, в т.ч. на ЦМР. Среди геоморфологических задач, которые

решаются подобными способами, бывает, например, автоматическое оконтуривание днищ долин у водотоков разных порядков [52], выделение границ горных систем (в т.ч. на планетных телах Солнечной системы [53]) или, например, вулканических конусов [54], друмлиновых полей и отдельных друмлинов [55] и т.д.

Активно продолжает развиваться комбинированный анализ моделей высот и спутниковых снимков на предмет автоматического выделения линеаментной сети и блоковой структуры территории. В ИКИ РАН это направление развивается А.А. Златопольским [56], за рубежом над проблемой работает целый ряд коллективов, их результаты кажутся весьма перспективными [например, 57].

**Нетиповые метрики.** Не снижается скорость разработки новых морфометрических показателей. Приведем лишь три, на наш взгляд, самых ярких примера этой тенденции и попытаемся показать, что это не составляет проблемы и что современные подходы, методы и вычислительные алгоритмы позволяют не “потеряться” в огромном количестве метрик.

Среди наиболее цитируемых в морфометрии рельефа наших соотечественников – П.А. Шарый и И.В. Флоринский, чьи разработки, кажется, очень опосредованно известны геоморфологам. В недавно защищенной первым из них докторской диссертации [58] и более ранней статье [59] дана содержательная интерпретация более чем десятка видов кривизны земной поверхности, в то время как в работах многих геоморфологов редко оказываются востребованы более двух из них. В основном, эти редко используемые локальные характеристики морфологии рельефа – вторые производные высоты ( $Z$ ) по ( $X$ ,  $Y$ ).

В последнее время возникают попытки дать качественную интерпретацию третьей производной высоты по плановым координатам. В упомянутой выше статье [59] высказывается мнение о сложности их корректного расчета в силу большой чувствительности к шуму в исходной модели высот. В. Олайя не так давно писал о затрудненной их содержательной интерпретации [60]. Однако в работе [61] показано, что производные третьего порядка могут эффективно использоваться для автоматического выделения островерхих гребней и днищ узких каньоно- и теснинообразных долин.

Многообразие морфометрических параметров и коэффициентов может путать, однако, уже сейчас появляются работы с попытками создания соответствующих моделей, позволяющих выбрать из большого перечня предикторов наиболее эффективный набор для содержательной классификации ЦМР. Так, например, в работе [62] для тестового участка были рассчитаны 230 морфометрических характеристик с помощью 11 различных программ. Авторы сами определили целью своей работы “устранение избыточности в использовании морфометрических характеристик при условии максимизации информации, даваемой ими” [62, с. 133]. Уже 13 из 230 атрибутов объясняют 83% всей дисперсии поля высот, при этом параметры, которые можно рассчитывать с помощью распространенных ГИС (в т.ч. коммерческих), объясняют лишь 67% дисперсии высот на тестовом участке. Использование рекурсивного, генетического или других подходов [30] к выбору репрезентативных наборов переменных, снижение размерности данных с помощью метода главных компонент с последующей кластеризацией/классификацией пикселей или более крупных выделов в модели высот – одно из возможных стержневых направлений автоматизированного геоморфологического картографирования в будущем.

Во всей работе внимание уделено, прежде всего, наиболее распространенному типу цифрового представления рельефа – регулярным ЦМР, но существуют и качественно иные типы этого представления, например, разрабатываемый И.Г. Черваневым и соавторами структурно-лингвистический подход [63] к описанию морфологии ЗП. Думается, это также весьма перспективное направление морфометрических исследований.

## ВЫВОДЫ

Итак, в работе поднимается вопрос о направлении развития морфометрии рельефа в связи с новейшим прогрессом в математических методах, доступных для анализа данных и вычислительной технике. В истории морфометрии рельефа было несколько периодов, когда исследователи, вооруженные доступными им методами, упирались в невозможность полезного приложения этих методов при текущем уровне производительности ЭВМ. С другой стороны, иногда перспективность морфометрических процедур заранее переоценивалась, а затем наступало разочарование в эффективности морфометрического анализа и математических методов в геоморфологии вообще. Думается, автоматизированные классификации рельефа по дистанционным данным (в первую очередь, ЦМР, но возможно применение и дополнительных данных – снимков в различных спектральных диапазонах и их временных рядов) – некий идеал развития морфометрического анализа рельефа, который необходимо держать в уме при любых методических или прикладных работах с применением геоморфометрии.

Непреодолимость таких преград для автоматизированных классификаций как невозможность четкого определения классовой принадлежности участков (к какому-либо типу форм или генетическому типу рельефа), геоморфологическая гомология и конвергенция, неинтерпретируемость предиктивных моделей – в значительной степени, надуманные, кажущиеся проблемы, отпугивающие неискушенного в математике, ГИС и программировании специалиста-геоморфолога. Даже при наличии хорошей математической подготовки неизбежно большое число проблем, с которыми столкнется любой исследователь при внедрении достижений машинного обучения и теории распознавания образов в решение традиционных геоморфологических задач, ибо пока нет такого способа морфометрического их решения, который бы разом убедил всех в высокой своей эффективности. Как следствие, развитие морфометрических идей происходит где-то на границе предметной области геоморфологии, а иногда считается чуть ли не маргинальной ветвью науки.

Сегодня передовые достижения в морфометрии рельефа часто связаны с работами ГИС- и ДДЗ-специалистов, почвоведов, геоэкологов и ландшафтоведов, даже интересующихся науками о Земле математиков и программистов, но редко – геоморфологов. Автору видится, что именно геоморфологи должны направлять развитие данной области знаний, чтобы появляющиеся методические конструкции были направлены именно на интерпретацию сущности форм рельефа, реконструкцию и прогноз их развития, а не конструирование метрик как вещей в себе. В связи с этим кажется полезным направить усилия на работу по следующим методическим векторам – содержательная кластеризация геоморфологических объектов (типов рельефа, отдельных форм и их элементов); классификация с обучением для воспроизведения экспертно-проводимых геоморфологических границ, а также установления наборов репрезентативных морфометрических характеристик для тех или иных объектов; развитие методов анализа “текстуры” рельефа, в основном, для проведения границ сложных объектов, например, областей развития рельефа однородного генезиса и возраста поверхности; разработка сложных, но осмысленных фокальных и региональных метрик, прицельно направленных на идентификацию специфичных типов форм рельефа.

Повторимся – нет оснований считать, что морфометрический анализ как метод познания вот-вот заменит все остальные методы в геоморфологии, однако, сегодня потенциал его не реализован и на малую часть. Автор надеется, что статья поспособствует реализации этого потенциала.

В статье не был поднят вопрос геоморфологического образования и обучения геоморфологов передовым методам анализа данных и способам большей, нежели сейчас, автоматизации своего труда. В то же время, очевидно, что дальнейшая математизация геоморфологии будет зависеть скорее от интереса к ней со стороны молодых специа-

листов, возможно, в первую очередь, даже студентов. Математический “блок” в учебных планах кафедр геоморфологии — также предмет отдельного уже назревшего обсуждения профессиональным сообществом.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнения при поддержке гранта РНФ № 19-17-00181. Анализ номенклатуры фокальных характеристик рельефа выполнен при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 17-05-00765 а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борсук О.А., Спасская И.И. Математические методы в геоморфологии // Теоретические и общие вопросы географии. Т. 1. М.: ВИНТИ, 1974. С. 65–153.
2. Симонов Ю.Г. Региональный геоморфологический анализ. М.: Изд-во МГУ, 1972. 251 с.
3. Симонов Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа. М.—Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. 272 с.
4. Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 251 с.
5. Ласточкин А.Н. Морфодинамический анализ. Ленинград: Недра, 1987. 256 с.
6. Ласточкин А.Н. Общая теория геосистем. СПб.: Лема, 2011. 980 с.
7. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications / Hengl T. and Reuter H.I. Ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2009. 765 p.
8. Doornkamp J.C. and King C.A.M. Numerical analysis in geomorphology: an introduction. Nottingham: Edward Arnold, 1970. 385 p.
9. Spatial Analysis in Geomorphology / R.J. Chorley Ed. London: Methuen & Co Ltd, 1972. 394 p.
10. Scheidegger A.E. Theoretical Geomorphology. Heidelberg: Springer-Verlag, 1961. 346 p.
11. Krumbein W.C. and Graybill F.A. An Introduction to Statistical Models in Geology. McGraw Hill, 1965. 475 p.
12. Florinsky I.V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Amsterdam: Elsevier / Academic Press, 2016. 486 p.
13. Кошкарев А.В. Источники данных для цифрового моделирования рельефа в геоморфологических исследованиях // Мат-лы XXXVI Пленума Геоморфологической комиссии РАН. Барнаул: Изд-во АлГУ, 2018. С. 201–207.
14. Воскресенский С.С. Геоморфология СССР. М.: Высш. шк., 1968. 372 с.
15. Мартонн Э. Основы физической географии. Т. II. Геоморфология. М.: Гос. уч.-пед. изд-во, 1954. 556 с.
16. Хейфец Б.С. Аппроксимирование топографической поверхности ортогональными многочленами П.Л. Чебышева // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1964. Вып. 2. С. 78–86.
17. Стругацкий А.Н., Стругацкий Б.Н. Полдень, XXII век (Возвращение). М.: Дет. лит., 1967. 320 с.
18. Николенко С.И., Кадурич А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
19. Phillips J. and O’Toole A.J. Comparison of human and computer performance across face recognition experiments // Image and Vision Computing. 2014. Vol. 32. Iss. 1. P. 74–85.
20. Phillips P.J., Yates A.N., Hu Y., Hahn C.A., Noyes E., Jackson K., Cavazos J.G., Jeckeln G., Ranjan R., Sankaranarayanan S., and Chen J.C. Face recognition accuracy of forensic examiners, superrecognizers, and face recognition algorithms // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018. P. 201721355.
21. Bojarski M., Del Testa D., Dworakowski D., Firner B., Flepp B., Goyal P., Jackel L. D., Monfort M., Muller U., Zhang X. End to End Learning for Self-Driving Cars [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1604.07316>. Дата обращения: 01.12.2018.
22. Ананьев Г.С., Андреева Т.С., Варущенко С.И., Воскресенский С.С., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Спасская И.И., Спиридонов А.И., Ульянова Н.С. Геоморфологическое районирование СССР и прилегающих морей. М.: Высш. шк., 1980. 343 с.
23. Тимофеев Д.А. О полиморфизме как общем свойстве земной поверхности // Геоморфология. 2006. № 2. С. 3–6.
24. Уфимцев Г.Ф. Геоморфологическая конвергенция // Геоморфология. 2009. № 4. С. 16–28.

25. *Гаврилов А.А.* О природе явлений геоморфологической конвергенции и гомологии // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 4. С. 3–12.
26. *Берлянт А.М.* Морфометрические исследования рельефа в СССР: состояние, проблемы, перспективы // Геоморфология. 1984. № 2. С. 15–24.
27. *Ласточкин А.Н.* Морфометрические исследования в геоморфологии. I. Классификация морфометрических построений и характеристик // Вестн. Лен. ун-та. Сер. 7. Геология, география. 1987. Вып. 3 (№ 11). С. 44–53.
28. *Ласточкин А.Н.* Морфометрические исследования в геоморфологии. II. Исследования морфологических особенностей земной поверхности // Вестн. Лен. ун-та. Сер. 7. Геология, география. 1988. Вып. 1 (№ 7). С. 37–50.
29. *Ласточкин А.Н.* Морфометрические исследования в геоморфологии. III. Исследования морфологии составных частей земной поверхности // Вестн. ЛГУ. Сер. 7. Геология, география. 1988. Вып. 3 (№ 21). С. 50–64.
30. *Kuhn M. and Johnson K.* Applied predictive modeling. New York: Springer, 2013. 615 p.
31. *Шарапов И.П.* Функции распределения высоты рельефа // Рельеф Земли и математика / Под ред. А.С. Девдариани. М.: Мысль, 1967. С. 72–79.
32. *Tomlin D.* Geographic information systems and cartographic modeling. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990. 250 p.
33. *Guisan A., Weiss S.B., and Weiss A.D.* GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution // Plant Ecology. 1999. No. 143. P. 107–122.
34. *Харченко С.В.* К вопросу о применении гармонического анализа при количественной характеристике рельефа // Геоморфология. 2017. № 2. С. 14–24.
35. *Skansi S.* Introduction to Deep Learning. From Logical Calculus to Artificial Intelligence. Springer, 2018. 193 p.
36. *Бронгулеев В.Вад.* Современные экзогеодинамические режимы Русской равнины // Геоморфология. 2000. № 4. С. 11–23.
37. Морфоструктура и морфоскульптура платформенных равнин СССР и дна омывающих его морей. М.: Наука, 1986. 190 с.
38. *Bugnicourt P., Guitet S., Santos V.F., Blanc L., Sotta E. D., Barbier N., and Coueron P.* Using textural analysis for regional landform and landscape mapping, Eastern Guiana Shield // Geomorphology. 2018. Vol. 317. P. 23–44.
39. *Guitet S., Cornu J-F., Brunaux O., Betbeder J., Carozza J-M., and Richard-Hansen C.* Landform and landscape mapping, French Guiana (South America) // Journal of Maps. 2013. No. 9(3). P. 325–335.
40. Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE), 2004. Geomorfologia do Estado do Amapá, 1:750,000. Base Cartográfica de Informações Ambientais por Estado, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Diretoria de Geociências [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bit.ly/2RdkR5v>. Дата обращения: 01.12.2018.
41. *Burningham H. and French J.* Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation // Geomorphology. 2017. Vol. 282. P. 131–149.
42. *Федосеев Г.С., Бабич В.В., Зайков В.В., Лебедев В.И., Плохих Н.А.* Распознавание образов в задачах качественного прогноза рудных месторождений. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1980. 208 с.
43. *Reichenbach P., Rossi M., Malamud B., Mihir M., and Guzzetti F.* A review of statistically-based landslide susceptibility models // Earth-science reviews. 2018. No. 180. P. 60–91.
44. *Pipaud I. and Lehmkuhl F.* Object-based delineation and classification of alluvial fans by application of mean-shift segmentation and support vector machines // Geomorphology. 2017. Vol. 293. P. 178–200.
45. *Rahmati O., Tahmasebipour N., Haghizadeh A., Pourghasemi H.R., and Feizizadeh B.* Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion // Geomorphology. 2017. Vol. 298. P. 118–137.
46. *Jasiewicz J. and Stepinski T.F.* Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms // Geomorphology. 2013. Vol. 182. P. 147–156.
47. *Грейсух В.Л.* Образное представление геоморфологической информации // Рельеф Земли и математика. М.: Мысль, 1967. С. 18–43.
48. *Etami E., Ahmad T., Bebis G., Nefian A., and Fong T.* Lunar Crater Detection via Region-Based Convolutional Neural Networks // Lunar and Planetary Science Conference. 2018. Vol. 49.

49. *Li W. and Hsu C.Y.* Automated terrain feature identification from remote sensing imagery: a deep learning approach // *Int. Journ. of Geogr. Information Sci.* 2018. P. 1–24.
50. *Latifovic R., Pouliot D., and Campbell J.* Assessment of Convolution Neural Networks for Surficial Geology Mapping in the South Rae Geological Region, Northwest Territories, Canada // *Remote Sensing.* 2018. No. 10(2). P. 307.  
<https://doi.org/10.3390/rs10020307>
51. *Dyke A.S. and Campbell J.E.* Surficial Geology, Abitau Lake, Northwest Territories, NTS 75-B; Canadian Geoscience Map 350 (Preliminary), Scale 1:100,000; Geological Survey of Canada: Ottawa, ON, Canada, 2018.
52. *Gilbert J.T., Macfarlane W.W., and Wheaton J.M.* The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks // *Computers & Geosciences.* 2016. Vol. 97. P. 1–14.
53. *Micheal A.A. and Vani K.* Automatic mountain detection in lunar images using texture of DTM data // *Computers & Geosciences.* 2015. Vol. 82. P. 130–138.
54. *Euillades L.D., Grosse P., and Euillades P.A.* NETVOLC: an algorithm for automatic delimitation of volcano edifice boundaries using DEMs // *Computers & Geosciences.* 2013. Vol. 56. P. 151–160.
55. *Saha K., Wells N.A., and Munro-Stasiuk M.* An object-oriented approach to automated landform mapping: A case study of drumlins // *Computers & Geosciences.* 2011. Vol. 37. No. 9. P. 1324–1336.
56. *Златопольский А.А.* Новые возможности технологии Lessa и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2011. Т. 8. № 3. С. 38–46.
57. *Farahbakhsh E., Chandra R., Olierook H.K., Scalzo R., Clark C., Reddy S.M., and Müller R.D.* Computer vision-based framework for extracting geological lineaments from optical remote sensing data // *arXiv preprint arXiv:1810.02320.* – 2018.
58. *Шарый П.А.* Геоморфометрический анализ пространственной изменчивости почв и экосистем. дис. ... докт. биол. наук. Ростов-н/Д: Юж. федер. ун-т, 2016. 319 с.
59. *Shary P.A., Sharaya L.S., and Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma.* 2002. No. 107. P. 1–32.
60. *Olaya V.* Basic land-surface parameters // *Geomorphometry: concepts, software, applications. Developments in Soil Science.* Vol. 33. Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 141–169.
61. *Minár J., Jenčo M., Evans I.S., Minár Jr. J., Kadlec M., Krcho J., Pacina J., Burian L., and Benová A.* Third-order geomorphometric variables (derivatives): definition, computation and utilization of changes of curvatures // *International Journal of Geographical Information Science.* 2013. No. 27:7. P. 1381–1402.
62. *Lecours V., Simms A., Devillers R., Edinger E., and Lucieer V.* Finding the Best Combinations of Terrain Attributes and GIS software for Meaningful Terrain Analysis // *Geomorphometry Geosci.* 2015. P. 133–136.
63. *Черваньов І.Г., Костріков С.В., Воробйов Б.Н.* Флювіальні геоморфосистеми: дослідження й розробки Харківської геоморфологічної школи. Харків: РВВ Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, 2006. 320 с.

## New Challenges of Geomorphometry and Automatic Morphological Classifications in Geomorphology

S. V. Kharchenko<sup>a,b,#</sup>

<sup>a</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of geography, Moscow, Russia*

<sup>b</sup> *Institute of Geography, RAS, Moscow, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: xar4enkkoff@yandex.ru*

Despite the rapid development of computational technologies and methods and the increasing number of publications related to the geomorphometric analysis of terrain, no summaries in this branch of geomorphology were created in the last decade. In the “Russian-language” articles and books in geomorphometry this problem is especially relevant. Sometimes, geomorphometry has become regarded as a semi-marginal discipline which has no real importance for studying of landforms. The list of the main drags for the geomorphometric analysis development is given in the article: geomorphological convergence and homolo-



gy, not-interpretability of complex statistical models, slight representativeness of common metrics for automatic tracing of geomorphological boundaries, and so on. The possible solutions of these problems on the way to the morpho-chrono-genetic mapping of landforms are scheduled. A short review is provided of clustering, classification, computer vision and pattern recognition, development and using of unusual geomorphometric variables. The article encourages geomorphologists to intensify their efforts (and to lead the researches if possible) in these four thematic directions to prevent the proceeding separation of traditional geomorphology and geomorphometry.

*Keywords:* geomorphometry, statistical models, clustering, classification, pattern recognition

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant No. 19-17-00181. Focal geomorphometric variables review was funded by the Russian Foundation of Basic Research, No. 17-05-00765 a.

#### REFERENCES

1. Borsuk O.A., Spasskaya I.I. Mathematical methods in geomorphology, in *Teoreticheskie i obshchie voprosy geografii* (Theoretical and general issues of geography). Vol. 1. Moscow: VINITI (Publ.), 1974. P. 65–153. (in Russ.)
2. Simonov Yu.G. *Regionalnyi geomorfologicheskii analiz* (Regional geomorphological analysis). Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta (Publ.), 1972. 251 p. (in Russ.)
3. Simonov Yu.G. *Morfometricheskii analiz rel'efa* (Geomorphometric analysis of terrain). Moscow–Smolensk: Izd-vo SGU (Publ.), 1998. 272 p. (in Russ.)
4. Simonov Yu.G. *Ob "yasnitel'naya morfometriya rel'efa* (Explanational geomorphometry). Moscow: GEOS (Publ.), 1999. 251 p. (in Russ.)
5. Lastochkin A.N. *Morfodinamicheskii analiz* (Geomorphodynamical analysis). Leningrad: Nedra (Publ.), 1987. 256 p. (in Russ.)
6. Lastochkin A.N. *Obshchaya teoriya geosistem* (The general theory of geosystems). Sankt-Peterburg: Lema (Publ.), 2011. 980 p. (in Russ.)
7. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Hengl T. and Reuter H.I. Ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2009. 765 p.
8. Doornkamp J.C. and King C.A.M. Numerical analysis in geomorphology: an introduction. Nottingham: Edward Arnold, 1970. 385 p.
9. Spatial Analysis in Geomorphology. R.J. Chorley. Ed. London: Methuen & Co Ltd, 1972. 394 p.
10. Scheidegger A.E. Theoretical Geomorphology. Heidelberg: Springer-Verlag, 1961. 346 p.
11. Krumbein W.C. and Graybill F.A. An Introduction to Statistical Models in Geology. McGraw Hill, 1965. 475 p.
12. Florinsky I.V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Amsterdam: Elsevier / Academic Press, 2016. 486 p.
13. Koshkarev A.V. Data sources for digital terrain modeling in geomorphological researches, in *Materialy XXXVI Plenuma Geomorfologicheskoi komissii RAN* (Proceedings of XXXVI Plenum of the Geomorphological Committee of RAS). Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta (Publ.), 2018. P. 201–207. (in Russ.)
14. Voskresenskij S.S. *Geomorfologiya SSSR* (Geomorphology of USSR). Moscow: Vysshaya shkola (Publ.), 1968. 372 p. (in Russ.)
15. Martonn E. *Osnovy fizicheskoi geografii. T. II. Geomorfologiya* (Basics of physical geography. Vol. 2. Geomorphology). Moscow: Gos. uch.-ped. izd-vo (Publ.), 1954. 556 p. (in Russ.)
16. Xejfec B.S. Approksimirovanie topograficheskoy poverxnosti ortogonalnymi mnogochlenami P.L. Chebysheva. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka* (Bulletin of High School. Geodesy and aerophotography). 1964. No. 2. P. 78–86. (in Russ.)
17. Strugackij A.N. and Strugackij B.N. *Polden, XXII vek (Vozvrashchenie)* (Noon: 22<sup>nd</sup> Century). Moscow: Det. lit. (Publ.), 1967. 320 p. (in Russ.)
18. Nikolenko S.I., Kadurin A.A., and Arxangelskaya E.O. *Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neuronnykh setei* (Deep learning. Dive into the world of neural networks). Sankt-Peterburg: Piter (Publ.), 2018. 480 p. (in Russ.)

19. Phillips J. and O'Toole A.J. Comparison of human and computer performance across face recognition experiments. *Image and Vision Computing*. 2014. Vol. 32. Iss. 1. P. 74–85.
20. Phillips P.J., Yates A.N., Hu Y., Hahn C.A., Noyes E., Jackson K., Cavazos J.G., Jeckeln G., Ranjan R., Sankaranarayanan S., and Chen J.C. Face recognition accuracy of forensic examiners, superrecognizers, and face recognition algorithms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. P. 201721355.
21. Bojarski M., Del Testa D., Dworakowski D., Firner B., Flepp B., Goyal P., Jackel L. D., Monfort M., Muller U., and Zhang X. End to End Learning for Self-Driving Cars [Electronic source]. Access way: <https://arxiv.org/abs/1604.07316>. Access date: December 1 2018.
22. Anan'yev G.S., Andreeva T.S., Varushchenko S.I., Voskresenskiy S.S., Leont'yev O.K., Luk'yano-va S.A., Spasskaya I.I., Spiridonov A.I., and Ul'yanova N.S. *Geomorfologicheskoe raionirovanie SSSR i prilgayushchikh morei* (Geomorphological regions of the USSR and nearest seas). M.: Vysshaya shkola, 1980. 343 p.
23. Timofeev D.A. Polymorphism as general attribute of land surface. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2006. No. 2. P. 3–6. (in Russ.)
24. Ufimcev G.F. Geomorphologic convergence. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2009. No. 4. P. 16–28. (in Russ.)
25. Gavrilov A.A. About the nature of geomorphologic convergence and homology phenomena. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* (Moscow University Bulletin. Series 5. Geography). 2016. No. 4. P. 3–12. (in Russ.)
26. Berlyant A.M. Geomorphometric studies in USSR: current state, challenges and perspectives. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 1984. No. 2. P. 15–24. (in Russ.)
27. Lastochkin A.N. Geomorphometric studies in geomorphology. P. I. Geomorphometric characteristics classification. *Vestnik Len. un-ta. Seriya 7. Geologiya, geografiya* (Leningrad University Bulletin. Series 7. Geology, geography). 1987. Vol. 3. No. 11. P. 44–53. (in Russ.)
28. Lastochkin A.N. Geomorphometric studies in geomorphology. P. II. Researches of morphological attributes of Earth's surface. *Vestnik Len. un-ta. Seriya 7. Geologiya, geografiya* (Leningrad University Bulletin. Series 7. Geology, geography). 1988. Vol. 1. No. 7. P. 37–50. (in Russ.)
29. Lastochkin A.N. Geomorphometric studies in geomorphology. P. III. Researches of morphology of Earth's surface elements. *Vestnik LGU. Seriya 7. Geologiya, geografiya* (Leningrad University Bulletin. Series 7. Geology, geography). 1988. Vol. 3. No. 21. P. 50–64. (in Russ.)
30. Kuhn M. and Johnson K. Applied predictive modeling. New York: Springer, 2013. 615 p.
31. Sharapov I.P. Statistical distributions of elevation functions, in *Rel'ef Zemli i matematika* (Earth's surface and mathematics). Moscow: Mysl (Publ.), 1967. P. 72–79. (in Russ.)
32. Tomlin D. Geographic information systems and cartographic modeling. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990. 250 p.
33. Guisan A., Weiss S.B., and Weiss A.D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*. 1999. No. 143. P. 107–122.
34. Kharchenko S.V. Application of harmonic analysis for the quantitative description of earth surface topography. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 2. P. 14–24. (in Russ.)
35. Skansi S. Introduction to Deep Learning. From Logical Calculus to Artificial Intelligence. Springer, 2018. 193 p.
36. Bronguleyev V.Vad. Recent exogeodynamic regimes of the Russian plain. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2000. No. 4. P. 11–23. (in Russ.)
37. *Morfostruktura i morfoskopultura platformennykh ravnin SSSR i dna omyvayushchikh ego morei* (Morphostructure and morphosculpture of platform plains of the USSR and of the bottom of nearest seas). Moscow: Nauka (Publ.), 1986. 190 p. (in Russ.)
38. Bugnicourt P., Guitet S., Santos V. F., Blanc L., Sotta E. D., Barbier N., and Couteron P. Using textural analysis for regional landform and landscape mapping, Eastern Guiana Shield. *Geomorphology*. 2018. Vol. 317. P. 23–44.
39. Guitet S., Cornu J-F., Brunaux O., Betbeder J., Carozza J-M., and Richard-Hansen C. Landform and landscape mapping, French Guiana (South America). *Journal of Maps*. 2013. No. 9(3). P. 325–335.
40. Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE), 2004. Geomorfologia do Estado do Amapá, 1:750000. Base Cartográfica de Informações Ambientais por Estado, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Diretoria de Geociências [Electronic source]. Access way: <https://bit.ly/2RdkR5v>. Access date: 01.12.2018.

41. Burningham H. and French J. Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation. *Geomorphology*. 2017. Vol. 282. P. 131–149.
42. Fedoseev G.S., Babich V.V., Zaykov V.V., Lebedev V.I., and Plokhikh N.A. *Raspoznavanie obrazov v zadachakh kachestvennogo prognoza rudnykh mestorozhdenii* (Pattern recognition for qualitative forecasting of ore deposits). Novosibirsk: Nauka (Publ.), 1980. 208 p. (in Russ.)
43. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B., Mihir M., and Guzzetti F. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-science reviews*. 2018. No. 180. P. 60–91.
44. Pipaud I. and Lehmkuhl F. Object-based delineation and classification of alluvial fans by application of mean-shift segmentation and support vector machines. *Geomorphology*. 2017. Vol. 293. P. 178–200.
45. Rahmati O., Tahmasebipour N., Haghizadeh A., Pourghasemi H. R., and Feizizadeh B. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*. 2017. Vol. 298. P. 118–137.
46. Jasiewicz J. and Stepinski T.F. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*. 2013. Vol. 182. P. 147–156.
47. Grejsukh V.L. Image representation of geomorphological data, in *Rel'ef Zemli i matematika* (Earth's surface and mathematics). Moscow: Mysl (Publ.), 1967. P. 18–43. (in Russ.)
48. Emami E., Ahmad T., Bebis G., Nefian A., and Fong T. Lunar Crater Detection via Region-Based Convolutional Neural Networks. *Lunar and Planetary Science Conference*. 2018. Vol. 49.
49. Li W. and Hsu C.Y. Automated terrain feature identification from remote sensing imagery: a deep learning approach. *International Journal of Geographical Information Science*. 2018. P. 1–24.
50. Latifovic R., Pouliot D., and Campbell J. Assessment of Convolution Neural Networks for Surficial Geology Mapping in the South Rae Geological Region, Northwest Territories, Canada. *Remote Sensing*. 2018. No. 10(2). P. 307.
51. Dyke A.S. and Campbell J.E. Surficial Geology, Abitau Lake, Northwest Territories, NTS 75-B; Canadian Geoscience Map 350 (Preliminary), Scale 1:100000; Geological Survey of Canada: Ottawa, ON, Canada, 2018.
52. Gilbert J.T., Macfarlane W.W., and Wheaton J.M. The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks. *Computers & Geosciences*. 2016. Vol. 97. P. 1–14.
53. Micheal A.A. and Vani K. Automatic mountain detection in lunar images using texture of DTM data. *Computers & Geosciences*. 2015. Vol. 82. P. 130–138.
54. Euillades L.D., Grosse P., and Euillades P.A. NETVOLC: an algorithm for automatic delimitation of volcano edifice boundaries using DEMs. *Computers & Geosciences*. 2013. Vol. 56. P. 151–160.
55. Saha K., Wells N.A., and Munro-Stasiuk M. An object-oriented approach to automated landform mapping: A case study of drumlins. *Computers & Geosciences*. 2011. Vol. 37. No. 9. P. 1324–1336.
56. Zlatopolskij A.A. New LESSA technology resources and digital terrain map analysis. Methodology, in *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Modern problems of remote sensing of the Earth from Space). 2011. Vol. 8. No. 3. P. 38–46. (in Russ.)
57. Farahbakhsh E., Chandra R., Olierook H.K., Scalzo R., Clark C., Reddy S.M., and Müller R.D. Computer vision-based framework for extracting geological lineaments from optical remote sensing data. *arXiv preprint arXiv:1810.02320*. 2018.
58. Shary P.A. *Geomorfometricheskii analiz prostranstvennoi izmenchivosti pochv i ekosistem* (Geomorphometric analysis of spatial variability of soils and ecosystems). PhD thesis. Rostov-on-Don: South Federal University, 2016. 319 p. (in Russ.)
59. Shary P.A., Sharaya L.S., and Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*. 2002. No. 107. P. 1–32.
60. Olaya V. Basic land-surface parameters. *Geomorphometry: concepts, software, applications. Developments in Soil Science*. Vol. 33. Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 141–169.
61. Minár J., Jenčo M., Evans I.S., Minár Jr. J., Kadlec M., Krcho J., Pacina J., Burian L., and Benová A. Third-order geomorphometric variables (derivatives): definition, computation and utilization of changes of curvatures. *International Journal of Geographical Information Science*. 2013. No. 27:7. P. 1381–1402.
62. Lecours V., Simms A., Devillers R., Edinger E., and Lucieer V. Finding the Best Combinations of Terrain Attributes and GIS software for Meaningful Terrain Analysis. *Geomorphometry Geosci*. 2015. P. 133–136.
63. Chervan'ov I.G., Kostrikov S.V., Vorobjov B.N. *Flyuvial'ni geomorfosy'stemy': do-slidzhennya j rozrobky' Xarkivs'koyi geomorfologichnoyi shkoly* (Fluvial geomorphosystems: achievements of Kharkiv's geomorphological group). Kharkiv: Kharkiv National University named after V.N. Karazin, 2006. 320 p. (in Ukr.)