

УДК: 528.94: 911.52

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-523-539

Е.Ю. Колбовский¹, А.Н. Гуня², М.Н. Петрушина³

ОПЫТ СРАВНЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТРАДИЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ ПРИЭЛЬБУСЬЯ)

АННОТАЦИЯ

Теория природных ландшафтов – одна из центральных и наиболее сложных концепций современной физической географии. Как известно, в западной науке понятие «ландшафт» признается лишь как общее, поэтому закономерно, что геоинформационное моделирование во всем мире (за пределами России) в последние десятилетия было посвящено главным образом получению так называемого «ландшафтного покрова» Landuse-Landcover, представляющего собой мозаику видов землепользования с фрагментами культурных, урбанизированных и сохранившихся природных геосистем. Попытки геоинформационного моделирования на Западе, направленные на разработку прогнозных карт растительности, почвенного покрова и «местообитаний», по содержанию и применяемым алгоритмам схожи с подходами, используемыми для полуавтоматизированного картографирования геосистем в России. Развитие методов геоинформационного моделирования ландшафтов во многом было связано с преодолением теоретических сложностей и спорных «сюжетов» российского ландшафтоведения, к которым можно отнести представления о роли морфолитогенной основы и биоты ландшафта, учет «ведущих» факторов дифференциации, наличие объективных пространственных иерархических уровней ландшафтной дифференциации и другие. В данной статье на примере ключевого участка Национального парка «Приэльбрусье» сравниваются возможности традиционной техники ручного картографирования с картографированием в геоинформационной среде. Продемонстрировано, что интуитивные действия, предпринимаемые экспертом, создающим ландшафтную карту, хотя и не являются в действительности строго алгоритмичными, тем не менее, близки по содержанию к сложным вариантам кластерного анализа. Обосновано, что оптимальным вариантом ландшафтного синтеза является не оверлей конечных классов морфолитогенной основы и биоты, а совместный анализ (кластерная или изокластерная классификация) многих исходных переменных, в частности геоморфометрических показателей и ландшафтно-вегетационных индексов. Контролируемые классификации с созданием обучающих файлов по авторским ручным ландшафтными картам дают худший результат по сравнению с неконтролируемыми, что, свидетельствует, во-первых, о неточности рисованных карт, во-вторых, об интуитивно используемом экспертами приемах, которые могут быть обозначены как «смена правил на лету» и которые не так просто реализовать с применением алгоритмов геоинформационного моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: природные ландшафты, экспертное ручное ландшафтное картографирование, геоинформационное моделирование ландшафтов

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: kolbowski@mail.ru

² Институт Географии РАН, 119017, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4. Москва, Россия, *e-mail*: a.n.gunya@igras.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: mnpetrushina@mail.ru

Evgenii Iu. Kolbovskii¹, Alexey N. Gunya², Marina N. Petrushina³

A COMPARISON OF GIS LANDSCAPE MODELING AND TRADITIONAL LANDSCAPE MAPPING (BY THE EXAMPLE OF THE ELBRUS REGION)

ABSTRACT

The theory of natural landscapes is one of the central and most complex concepts of modern physical geography. As is well known, in Western science, the concept of “landscape” is recognized only as a general one and is usually used to designate geosystems that have been exposed to anthropogenic influence for a long time. In this regard, geoinformation modeling all over the world (outside Russia) in recent decades has been mainly devoted to obtaining the so-called “landscape cover” Landuse-Landcover, which represents some kind of land use types, fragments of cultural landscape and urbanized areas mixture. Attempts at geoinformation modeling aimed at delimiting territorial natural complexes in the West and developing predictive maps of vegetation, soil cover and “habitats” are similar in content and algorithms to the approaches used for semi-automated mapping of natural landscapes. The development of synthetic geoinformation modeling methods was largely associated with overcoming the theoretical difficulties and controversial “plots” of Russian landscape science, which include ideas about the role of the morpholithogenic basis and biota of the landscape, taking into account the “leading” factors of differentiation, the presence of objective spatial hierarchical levels of landscape differentiation, and others. In this article, using the example of a key area of the Elbrus Region National Park, the capabilities of the traditional technique of expert-manual mapping are compared with mapping in a geoinformation environment. It is shown that the intuitive actions taken by an expert drawing a landscape map, although not strictly algorithmic in reality, are nevertheless close in content to complex variants of cluster analysis and decision trees. It is substantiated that the best option for landscape synthesis is not an overlay of finite classes of the morpholithogenic base and biota, but a joint analysis (cluster or isocluster classification) of many initial variables, in particular, geomorphometric parameters and landscape-vegetation indices. Supervised classifications with the creation of training files based on the author’s manual landscape maps give the worst result compared to uncontrolled ones, which, firstly, indicates the inaccuracy of the drawn maps, and secondly, the authors’ failure to comply with any strict algorithms and phenomena, which may be labeled as “changing the rules on the fly”.

KEYWORDS: natural landscapes, state of art manual landscape mapping, GIS landscape modeling

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* **kolbowsky@mail.ru**

²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 119017, Staromonetnyi lane. 29, Moscow, Russia, *e-mail:* **a.n.gunya@igras.ru**

³Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* **mnpetrushina@mail.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Вторжение так называемых Больших Данных [Майер-Шенбергер, Кукьер, 2014] в географии означало появление огромного числа сведений об объектах, явлениях и процессах, сопровождаемых точной пространственной привязкой, проще говоря, координатами в одной из принятых географических или геодезических координатных систем. Важнейшими последствиями этого феномена можно считать [Колбовский, 2020]:

- 1) генерацию новых, открытых и доступных данных (прежде всего данных дистанционного зондирования Земли из космоса),
- 2) разработку специфических программируемых инструментов работы с данными – географических информационных систем (ГИС),
- 3) математизацию и алгоритмизацию традиционных методов географических исследований (“geocomputation”),
- 4) кризис традиционных причинно-следственных объяснений и обоснование новых и сложных для понимания моделей, в том числе – основанных на нечеткой логике.

Новые методы геоинформационного анализа стали востребованы, прежде всего, для моделирования морфолитогенной основы ландшафта, мезоформ и элементарных поверхностей рельефа [Shary et al., 2002; Schmidt, Hewitt, 2004; Florinsky, 2009; Florinsky, 2017; Evans et al., 2009; Evans, 2012], и, отдельно – ландшафтной биоты, точнее – растительного покрова и видов землепользования [Boehner, Selige, 2006; Zhang et al., 2013; Zhang et al., 2016]. Попытки комплексного моделирования интегрированных свойств земной поверхности в современной западной науке относятся не к ландшафту, а к почвенному покрову [Wilson, 2018].

Анализ основных подходов, посвященных алгоритмам геоинформационного моделирования в рамках науки о ландшафте и ландшафтной экологии [Виноградов, 1998; Шарый, 2006; Hengl, MacMillan, 2009; Jasiewicz et al., 2014; Wilson, 2018], позволяет выявить две закономерности. Во-первых, развитие алгоритмов ГИС-моделирования в известной мере повторяет историю становления методов традиционного картографирования, прежде всего, в смысле отражения базовых свойств ландшафтной дифференциации: сначала выявление специфики места (местоположения, геотопа), затем – отражение склоновой (катенарной) дифференциации, далее – учет гребне-килевой дифференциации, и наконец – попытка разработки комплексных классификаторов «ландшафтного поля». Во-вторых, применение ГИС-моделирования сталкивается с рядом проблем:

- проблема нечеткой дифференциации любых отдельных параметров-свойств;
- проблема «континуальности границ», «ядер типичности» и переходов между ними;
- необходимость учета смены «ведущего фактора» как на одном пространственном уровне ландшафтной дифференциации, так и при переходе с нижних уровней на верхние;
- проблема объективности существования фиксированных пространственных уровней ландшафтной дифференциации, независимых от масштаба моделирования;
- проблема «субъективности эксперта», проявляющаяся в том, что разные специалисты разрабатывают разные карты на одну и ту же территорию.

Преодоление этих проблем невозможно без обращения к богатому опыту экспертного картографирования и сравнительного анализа алгоритмов геоинформационного моделирования с действиями «классического» ландшафтоведа. Подобное сравнение позволит, с одной стороны, оценить саму потенциальную возможность полуавтоматического моделирования ландшафтов, с другой – более объективно взглянуть на реальность феномена.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования является сравнение традиционного подхода к ландшафтному картографированию с современными алгоритмами полуавтоматизированного картографирования. В качестве объекта исследования привлечена территория верховьев р. Баксан – южного Приэльбрусья, на которую составлена ландшафтная карта [Гуля, 1990], где нашли отражение 5 типов и 13 подтипов ландшафтов (рис. 1, табл. 1).

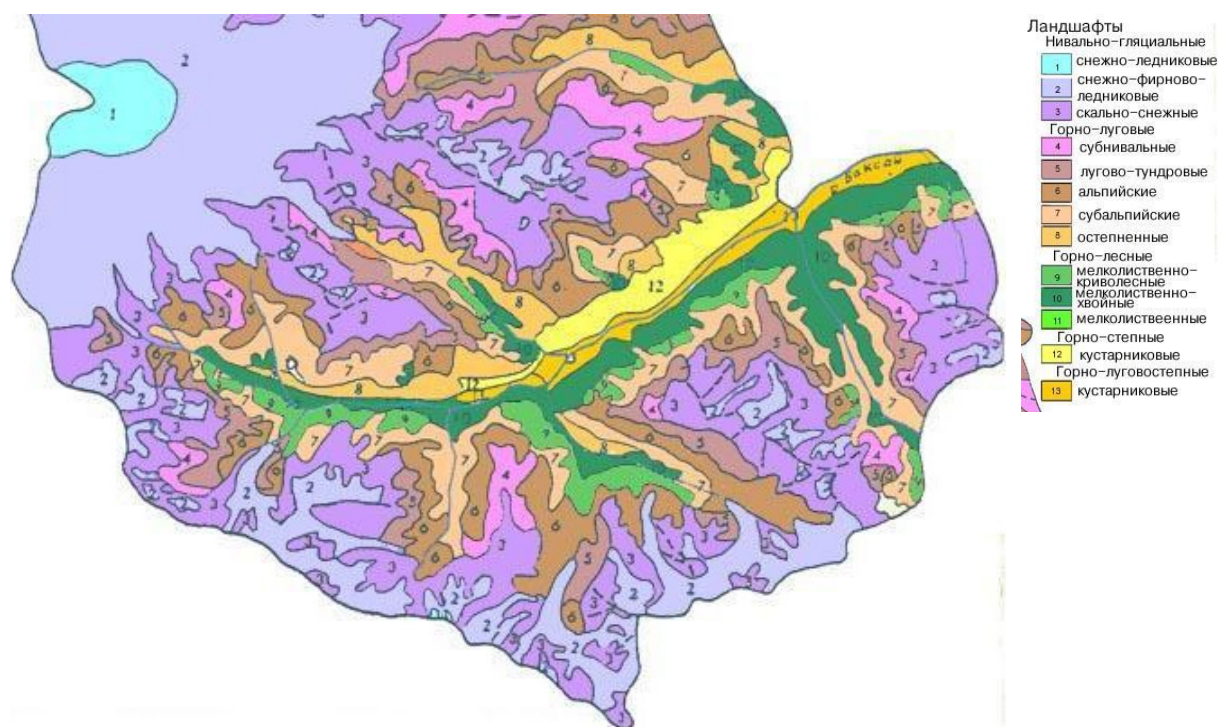


Рис. 1. Фрагмент экспертной ландшафтной карты на территорию национального парка «Приэльбрусье»

Fig. 1. Fragment of an expert (state of art) landscape map on the territory of the “Elbrus” National Park

Табл. 1. Типы и подтипы ландшафтов национального парка «Приэльбрусье»
Table 1. Types and subtypes of landscapes of the “Elbrus” National Park

№	Типы и подтипы ландшафтов	Критерии выделения при экспертном ручном картографировании	
		Морфолитогенная основа	Типы растительности и современное землепользование
1	Нивально-гляциальные	Выше 3500 м (в отдельных случаях на склонах северной экспозиции – выше 3200 м)	Снег, лед без следов использования
1.1	Ледниковые Снежно-ледниковые	Более 4500 м	Снег, лед без следов использования, господство отрицательных температур
1.2	Снежно-фирново-ледниковые	На абсолютных высотах 3500 – 4500 м	Снег, лед без следов использования, небольшой период с максимальными положительными температурами
1.3	Скально-снежные, с фрагментарным развитием накипных лишайников	Выше 3500 м (в отдельных случаях на склонах северной экспозиции – выше 3200 м)	Нет сплошного снега и льда, скально-снежные участки на летних снимках, все еще зона минимальных среднесуточных температур

№	Типы и подтипы ландшафтов	Критерии выделения при экспертном ручном картографировании	
		Морфолитогенная основа	Типы растительности и современное землепользование
2	Горно-луговые	с 2000 м до границы нивально-гляциальных ландшафтов	Задернованность и вегетация, отмечаемая на летних снимках
2.1	Субнивальные	3000 (3100) – 3500 м	Проективное покрытие около 10–20 %, как правило, не используемые
2.2	Лугово-тундровые	2900 – 3100 м	Проективное покрытие 20–50 %, как правило, не используемые
2.3	Альпийские	2700 – 2900 м	Проективное покрытие 50–75 %, как правило, редко используемые в качестве летних пастбищ
2.4	Субальпийские	2400 – 2700 м	Проективное покрытие более 75 %, летние пастбища, реже – сенокосы
2.5	Остепненные	Склоны южной экспозиции, 2000 (1900) – 2400 м	Проективное покрытие более 75 %, сезонные пастбища, реже – сенокосы
3	Горно-лесные	До 2400 (2500) м, в основном, на склонах северной экспозиции	Лесная растительность разной степени сомкнутости
3.1	Мелколиственно-криволесные	Как правило, склоны северной экспозиции 2300 – 2500 м	Березовые криволесья, куртинами, не используются
3.2	Мелколиственно-хвойные	до 2300 м, склоны северной экспозиции, днище долины, реже – склоны южной экспозиции	Сосновые леса с примесью березы, использование по днищам долин для рекреации
3.3	Мелколиственные	Ущелья р. Малки и ее притоков	Березовые мелколесья, не используются
4	Горно-степные	Склоны южной экспозиции до 1900 м	Степи с пятнами можжевельника, проективное покрытие около 40–60 %, используются под круглогодичный выпас
4.1	Кустарниковые		
5	Горно-лугово-степные	Днище долины ниже 1800 м	Окультуренный ландшафт: селитьбы, поливные сенокосы

Исходный вариант ландшафтной карты был создан традиционным ручным способом на подоснове крупномасштабной (1:10 000). Переход от традиционного картографирования к современным методам геоинформационного моделирования может быть осуществлен через реализацию последовательно усложняющихся (и исторически сменявших один другого) алгоритмов:

1) экспертно-интуитивное выделение границ способом ручного рисования – первоначально в программе векторной графики, позже в различных ГИС-пакетах;

2) гибридное экспертно-компьютерное картографирование на основе комбинированного оверлея в среде ГИС предварительно оцифрованных традиционных тематических карт (геологических, геоморфологических, геоботанических, почвенных и т.д.) [Bailey, 1998];

3) комбинированный оверлей классифицированных растровых переменных (производных от ЦМР и снимков типа Landsat), изначально полученных в ГИС и отображающих различные параметры морфолитогенной основы и растительного покрова/землепользования;

4) учет катенарной (склоновой) и гребне-килевой дифференциации с использованием соответствующих геоморфометрических переменных (например – индекса относительного положения на склоне) [Wilson, Gallant, 2000; De Reu et al., 2013];

5) модели нечеткого наложения с использованием переменных с нечеткой принадлежностью [Burrough et al., 2000];

6) полуавтоматизированные модели кластеризации и группирования, основанные на k-средних, искусственных нейронных сетях и деревьях классификации, применяемых к более или менее широкому набору переменных [Iwahashi, Pike, 2007];

7) иерархические (поэтапно выполняемые) модели с участием эксперта, задающего правила в рамках классической или нечеткой логики и смены «ведущего фактора дифференциации».

Экспертно-интуитивный подход (в западной науке часто именуется как «гештальт-метод») [Wilson, 2018] заключается в экспертном выделении и ручном рисовании границ геосистем. В своем «классическом» виде он был отработан первоначально в отечественном почвоведении [Временная методика, 1984; Степанов, 2006] и доведен до совершенства в рамках методики российского ландшафтного картографирования [Исаченко, 1999]. Сущность метода заключается в том, что эксперт выделяет границы ландшафтов (или их частей) сначала в камеральных условиях, ориентируясь на несколько источников-подложек (карта четвертичных отложений, разгруженная топографическая карта с горизонталями, фотоплан), действуя частично в рамках задаваемых правил формальной логики («если – то»), частично – руководствуясь интуицией (опытом). Сегодня классический метод не утратил своего значения (прежде всего – дидактического, обучающего), и воспроизводится в ГИС, являя собой вариант рисования в векторных слоях или “State of Art Mapping” [Атлас..., 2013].

Гибридное экспертно-геоинформационное картографирование опирается на векторизацию бумажных карт, создание и наложение нескольких слоев. Таким образом, например, была построена государственная Ландшафтная карта Мингео СССР масштаба 1:2 500 000¹. Основным методом синтеза в рамках этого подхода было простое наложение – процедура, которая технически совершенно аналогична оверлею в современных ГИС: комбинированию растров или пересечению полигональных векторов. К. Лоуэлл [Lowell, 1990] и Р. Бейли [Bailey, 2009] отмечали, что, хотя наложение карт представляется самым логичным методом идентификации экосистем, этот подход имеет недостатки, к которым можно отнести:

- произвольность и невозпроизводимость классификаторов, неизбежно возникавшая в результате смещения тематик, изначально разработанных под разные задачи;
- эффект информационного шума, проявляющийся в избыточном количестве классов, многие из которых статистически ничтожны;
- эффект мозаичной «пилы» вдоль границ классов;
- невысокая, как правило, точность (в том числе вследствие разномасштабности исходных материалов).

В итоге многочисленные эксперименты в этой сфере наводят на мысль о невозможности корректного сочетания переменных, полученных на основе оцифровки старых тематических карт, так или иначе являющихся результатом традиционного ручного картографирования [Sayre et al., 2013].

Отказ от методов простого оверлея можно считать окончанием периода «наивного» ГИС-моделирования, поскольку дальнейшее развитие геоинформационных моделей

¹ *Ландшафтная карта*. отв. ред. И.С. Гудилин. М.: Мин-во геологии СССР, Гидроспецгеология, 1980. Масштаб 1:2 500 000.

базировалось на разработке специальных, базирующихся на математике и геостатистике методов анализа и классификации [Wilson, 2018; Grekousis, 2020]. Более позднее геоинформационное моделирование связано с появлением работ, в которых наложению подвергались не оцифрованные, а новые тематические факторные слои (растровые и векторные), изначально полученные в ГИС посредством преобразования цифровой модели рельефа (ЦМР) или дешифрирования космических снимков, расчета различных коэффициентов по разным композитам каналов и т.д. [Evans et al., 2009].

Наиболее близкий к алгоритмам традиционного ландшафтоведения подход предполагает синтез двух предварительно классифицированных слоев: морфолитогенной основы в виде классов ландшафтных местоположений (мезоформ и элементарных поверхностей рельефа – landform, landsite) [Jasiewicz, Stepinski, 2013] и биоты в виде классифицированных типов растительности/типов землепользования (LULC – land use/land cover) [Hansen et al., 2022].

Другой, более сложный подход заключается в «сборке» из более-менее обширного набора слоев, являющихся частными характеристиками ландшафтных местоположений и растительного покрова. В рамках этого подхода можно выделить два метода. Первый – когда в роли переменных для характеристики местоположений используются вторичные (региональные) метрики (индекс топографической позиции или относительное положение на склоне, топографическая открытость, глубина долин, и др.), а для характеристики растительного покрова – ландшафтные (в том числе вегетационные, но не только) индексы.

Второй метод предполагает агрегирование и классификацию относительно большого числа первичных (локальных) метрик, (уклон, экспозиция, различные виды кривизны, индекс конвергенции и т.д.) и отдельные каналы космических снимков или неклассифицированные вегетационные индексы.

Различие между этими вариантами в том, что в случае привлечения большого числа первичных метрик мы в большей степени уstraляемся от экспертного участия, каковое включает экспертную переклассификацию, т.е. дифференциацию сложных переменных посредством выбора числа и пороговых значений классов. Ведь если значение индекса топографической позиции является отражением гребне-килевой дифференциации, то высота, уклон, профильная/горизонтальная кривизна характеризуют первичные параметры данной точки поверхности, и, следовательно, мы перепоручаем полуавтоматическому ГИС-алгоритму большой объем «работы» по компоновке итоговых таксонов получаемого в итоге прототипа ландшафта.

Два охарактеризованных выше подхода к классификации и делимитации в рамках геоинформационного моделирования различаются по нескольким основаниям:

- 1) степени вовлечения экспертного знания (максимально – в первом, минимально – во втором);
- 2) прозрачности процесса моделирования (в первом случае мы можем судить о том, из каких именно исходных классов биоты и ландшафтных местоположений образовались конечные классы ландшафтов, во втором – перед нами условно «серый ящик», хотя по таблицам статистики, скажем, в случае кластерного анализа мы можем установить значения всех привлеченных параметров);
- 3) числу используемых для делимитации и классификации слоев-переменных, характеристик ландшафтных местоположений, биоты и землепользования (первый подход – две, второй – от 3-6 до более чем 5-8);
- 4) сложности интерпретации результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты делимитации и классификации ландшафтов в рамках первого подхода

Для апробации первого подхода результаты классификации ландшафтных местоположений (форм мезорельефа) интегрировались с классификацией растительного покрова и землепользования в рамках представлений о природном ландшафте. В качестве

исходных использовались полученные ранее слои сегментированного рельефа (K-среднее кластеризация по семи морфометрическим переменным в SAGA) и автоматического дешифрирования изображения Landsat 8 (неконтролируемая кластеризация на основе каналов SWIR2-NIR Red-Green) на ключевую территорию Приэльбрусья (рис. 2).

Перемножение 14 классов растительного покрова/землепользования и 16 классов рельефа образует мозаику из 224 классов, которые достаточно сложно интерпретировать. Оптимизация может быть достигнута путем фильтра и генерализации раstra, но число классов изменяется при этом незначительно. Дальнейшая оптимизация должна проводиться экспертом, который совершает два действия: выделение ничтожных классов и избавление от них путем переклассификации по экспертным правилам.

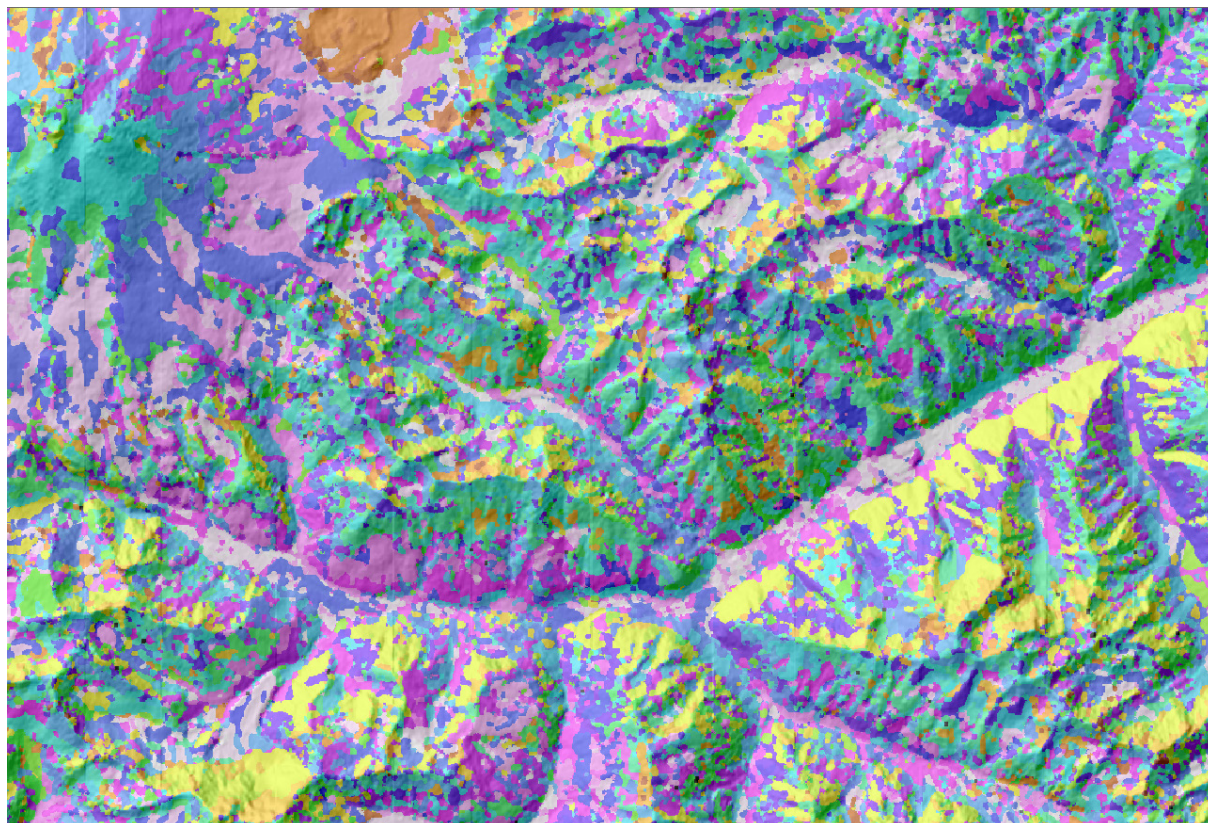


Рис. 2. Результат синтеза ландшафтных местоположений и LULC комбинированием в ArcMAP 10.5

Fig. 2. The result of the synthesis of landscape sites and LULC by combining in ArcMap 10.5

Усложненным инвариантом простого оверлея можно считать алгоритм, отражающий ведущую роль морфолитогенной основы ландшафта. Эта позиция представлена в классических работах основоположников московской ландшафтной школы Н.А. Солнцева [Солнцев, 2001] и В.Н. Солнцева [Солнцев, 1981], а также позднее – в работах представителей ленинградской школы ландшафтоведения Г.А. Исаченко и А.И. Резникова [Исаченко, Резников, 1996]. Если понимать под ландшафтным местоположением (или геотопом по А.Н. Ласточкину [Ласточкин, 2002]) условное «вместилище» для биоты, то последнюю можно рассматривать как «состояние» ландшафта [Исаченко, 1999]. В этом случае пространственная мозаика ландшафтных местоположений признается первичным фактором ландшафтного синтеза.

Очевидно, что передача сущности данного подхода в среде ГИС-моделирования требует иных инструментов оверлея, отличных от простого комбинирования растров. В качестве варианта можно рассматривать Зональную Статистику значений раstra биоты по векторно-полигональному слою ландшафтных местоположений [Колбовский, 2016].

Инструмент Зональная Статистика ArcMAP10.x содержит критически важную опцию Тип Статистики: в пределах любого конкретного полигона местоположений могут оказаться ячейки растра, принадлежащие к разным классам LULC – к одному, двум-трем и более. При интуитивном рисовании по двум подложкам (местоположений и биоты) эксперт принимает индивидуальное решение в каждом конкретном случае; в варианте ГИС-моделирования мы должны выбрать тип статистики: “mean”, “median” или “majority”. В данном случае, поскольку речь идет о качественно различающихся классах, т.е. о получении наиболее репрезентативного значения в нечисловых рядах, наиболее корректное значение дает “majority”.

Преимущества этого метода перед простым оверлеем способом комбинирования очевидны, и, в целом, подобное решение не так далеко от традиционного ландшафтного картографирования. Обратим внимание, что извлечение зональной статистики оказывает влияние на форму мозаики итогового растра, чтобы в этом убедиться, следует сравнить полученный растр зональной статистики с векторными контурами ландшафтных местоположений и LULC (рис. 3).

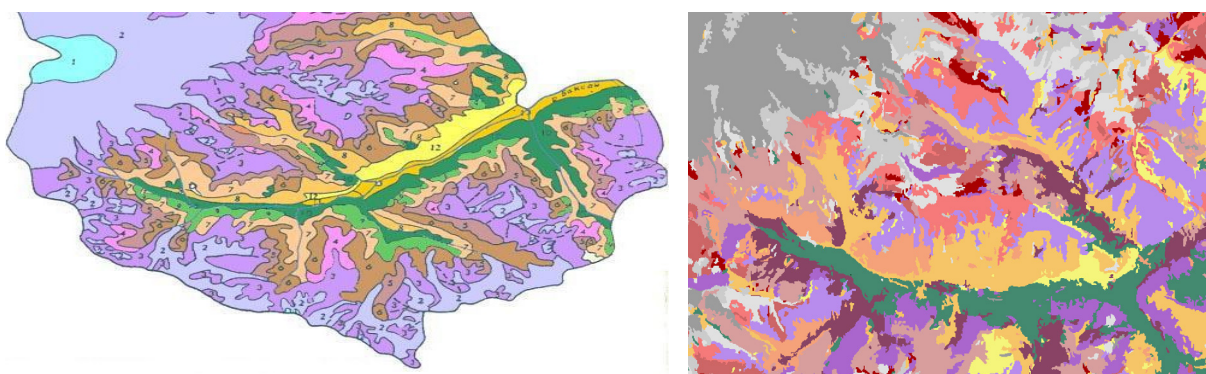


Рис. 3. Экспертная ландшафтная карта (слева) и растр зональной статистики LULC по полигонам ландшафтных местоположений (справа)

Fig. 3. Expert landscape map (left) and LULC zonal statistics raster using the polygons of landscape sites (right)

Сравнение растра зональной статистики LULC по полигонам ландшафтных местоположений с экспертной ландшафтной картой (рис. 3) показывает большое сходство. Многие контуры лесных и степных ландшафтов практически идентичны, что обусловлено высокой степенью связи ландшафтных местоположений, приуроченных к мезоформам рельефа и типа растительности: например, на склонах южных экспозиций – степи, а на склонах северной экспозиции – леса. Также схожи контуры ландшафтов с отсутствием или очень слабым развитием растительности – гляциальные на привершинных поверхностях и субнивальные луговые на верхних склонах хребтов. Более сложные проблемы синтеза морфолитогенной основы ландшафта и биоты предполагают использование алгоритмов кластерного анализа (неконтролируемого и с обучением), а также методов классификации максимального подобия и искусственной нейронной сети.

Результаты ландшафтного синтеза в рамках второго подхода

Изокластерный анализ является одним из способов классификации с интеграцией нескольких переменных. Алгоритм ISODATA Clustering for Grids пакета SAGA GIS позволяет выявить интегрированные сущности без точного указания оператором числа конечных классов: можно лишь определить минимальное и максимальное число будущих кластеров [Memarsadeghi et al., 2007]. Естественно, результат изокластерного анализа весьма чувствителен к числу и набору переменных (рис. 4).

Состав переменных:

1. нормализованная высота
2. уклон поверхности

3. топографическая открытость
4. глубина долин
5. максимальная кривизна
6. минимальная кривизна
7. IPVI – инфракрасный вегетационный индекс
8. NDWI – нормализованный дифференцированный водный индекс
9. NDMI – стандартизованный индекс различий увлажненности

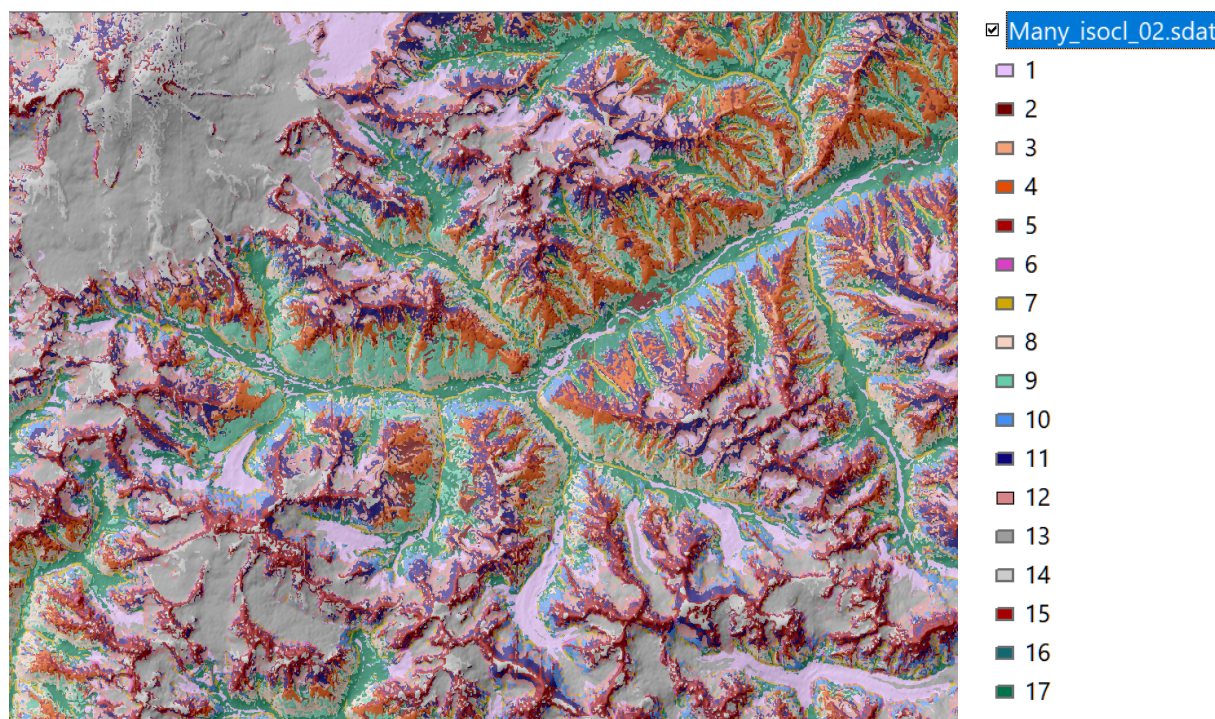


Рис. 4. Классификация по девяти переменным ISODATA Clustering for Grids SAGA GIS
Fig. 4. Classification by clustering of nine variables ISODATA Clustering for Grids SAGA GIS

Уменьшив число переменных, отражающих ландшафтные местоположения за счет введения нелокального показателя – индекса топографической позиции и введем ландшафтный индекс NDSI, специально предназначенный для выделения ледовых и снежных поверхностей (рис. 5):

1. индекс топографической позиции
2. уклон поверхности
3. топографическая открытость
4. индекс конвергенции
5. IPVI – инфракрасный вегетационный индекс
6. NDMI – стандартизованный индекс различий увлажненности
7. NDSI – стандартизованный индекс различий снежного покрова

Число привлеченных растров-переменных влияет на количество конечных классов: чем больше переменных, тем больше число итоговых таксонов. Качество привлеченных растров также оказывает влияние: региональные переменные с классифицированными значениями уменьшают число итоговых таксонов: введение индекса топографической позиции в последнем примере сократило число таксонов до 12. Замена или добавление даже единственного раstra в наборах геоморфометрических переменных или ландшафтных индексов заметно меняет мозаику итоговой классификации. Так, первая классификация хорошо передает элементы долинно-речной и эрозионной сети, а также катенарную дифференциацию. Присутствие минимальной кривизны позволяет разделить склоны на

локальные контрфорсы и тальвеги (распадки) между ними, использование максимальной кривизны выявляет хребты и локальные впадины. Ландшафтные и/или вегетационные индексы ответственны за генерацию более-менее протяженных ареалов в местах с относительно выровненным рельефом, что хорошо видно на примере второго варианта с присутствием трех индексов.

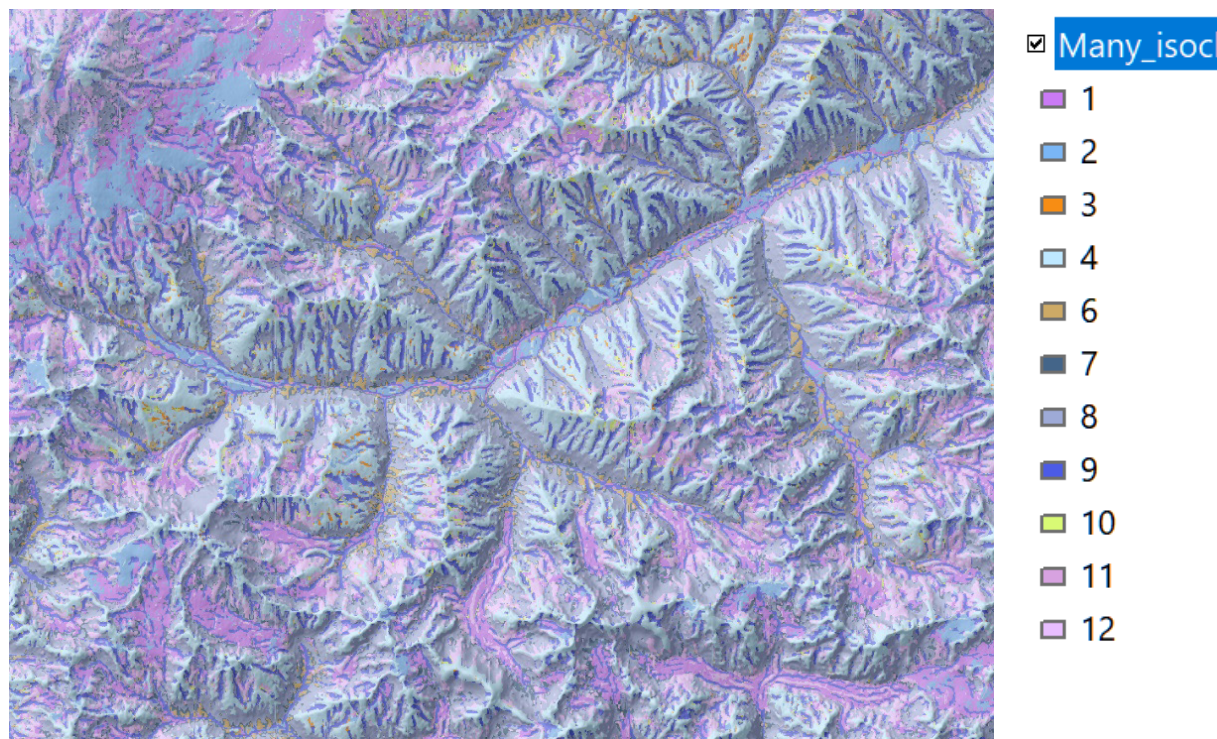


Рис. 5. Вариант классификации по семи переменным алгоритмом ISODATA Clustering for Grids SAGA GIS

Fig. 5. A variant of classification according to seven variables by the ISODATA Clustering algorithm for Grids SAGA GIS

SAGA GIS предлагает достаточно широкий набор популярных инструментов так называемого «машинного обучения». Decision Tree Classification использует алгоритм «дерева решений» на основе набора гридов, имитирующий процедуру решения задачи прогнозирования человеком [Iwahashi, Pike, 2007; Maxwell et al., 2018]. В общем случае это k-ичное дерево с правилами, представляющими собой некоторую функцию позволяющую определить в какую из дочерних вершин нужно поместить рассматриваемый объект [Kheir et al., 2010] (рис. 6).

Полученная с использованием алгоритма Decision Tree для ключевого участка Приэльбрусья классификация выдерживает заданное экспертной картой число классов, хорошо выделяет долину Баксана, передает катенарную и гребне-килевую классификацию местности; кроме того, алгоритм корректно выделяет классы склонов разной экспозиции. В целом можно констатировать, что при данном наборе параметров данный способ дает максимально близкий к традиционной ландшафтной карте результат.

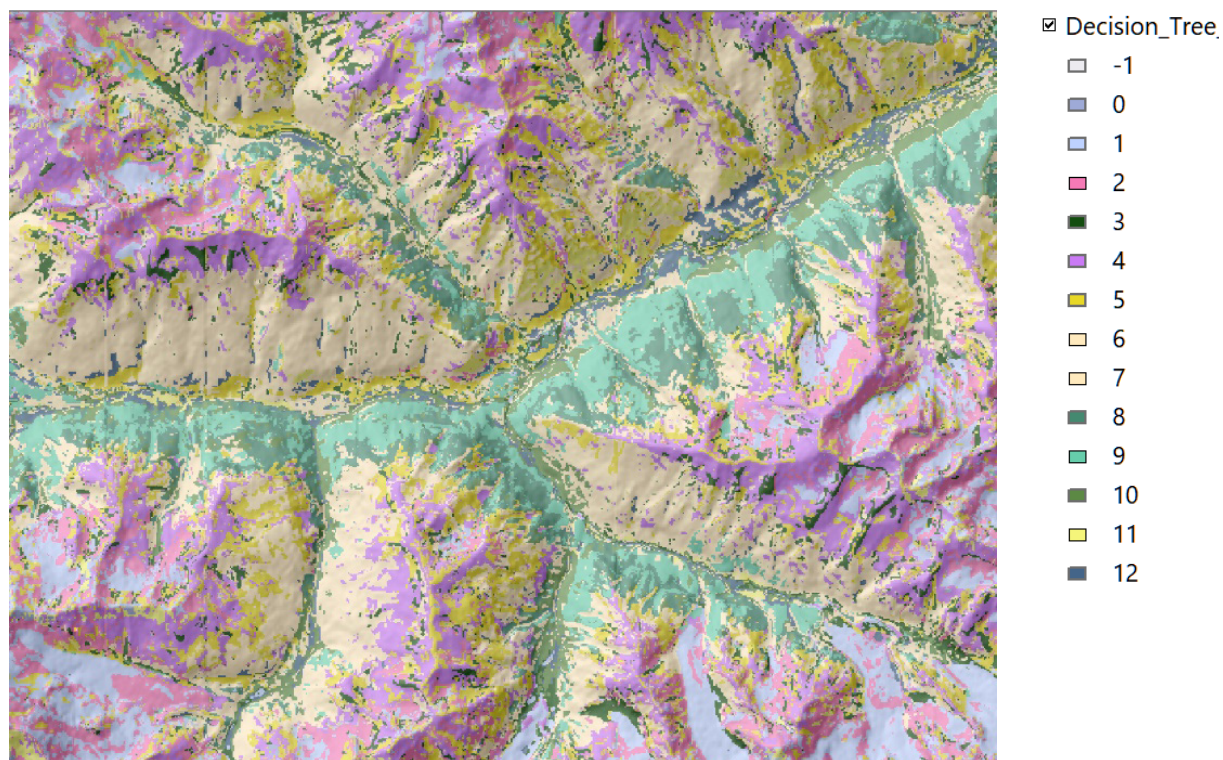


Рис. 6. Результат классификации по девяти переменным инструментом Decision Tree Classification SAGA GIS

Fig. 6. The result of classification by nine variables Decision Tree Classification SAGA GIS

ВЫВОДЫ

ГИС-моделирование в любой области географии и экологии – сложный и трудоемкий процесс, требующий определенной квалификации, знания объекта и тонкой настройки используемых инструментов. Разрабатываемые сегодня модели (в частности – алгоритмы геоморфологического, почвенного и экосистемного моделирования) можно охарактеризовать как синтетические, и в таком качестве они вбирают в себя все лучшее из накопленного за четверть века арсенала, а именно: разделение процесса на этапы, соответствующие разным пространственным (иерархическим) уровням, возможность выбора и смены ведущего фактора дифференциации на каждом из таких уровней, предварительное конфигурирование и параметрическое описание прогнозируемых сущностей, формулировку экспертных правил нечеткой принадлежности, использование алгоритмов кластерного анализа и «машинного обучения».

Обычная практика ручного ландшафтного картографирования часто индивидуальна, ее правила и процедуры не всегда являются строго алгоритмизированными. Следовательно, они не могут быть надежным методом создания баз данных и связанных с ними карт в современных условиях работы с Большими Данными. Разработанные в ГИС-моделировании приемы раз и навсегда получают доказательное обоснование и, что важно – являются воспроизводимыми. Однако идеальных алгоритмов моделирования на все случаи жизни не существует. Они различаются по набору и взаимным отношениям входных параметров, степени автоматизации, участию экспертного знания, числу этапов моделирования, возможности учета разных масштабов и свойств фрактальности, наконец (но не в последнюю очередь) – по предсказательной способности. Опираясь на полученный сравнительный анализ геоинформационного и экспертного картографирования, следует подчеркнуть, что ни один из этих методов не «лучше» в том смысле, что каждому присущи свои свойства, такие как простота (или сложность) использования, доступность и прозрачность интерпретации, чувствительность к размеру выборки и т. д.

БЛАГОДАРНОСТИ

Часть работы выполнена в рамках госзадания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова: № FZNU-2021-0011 «Изучение секвестрационного и эмиссионного потенциала карбонового полигона «ЭкоГрозный» и разработка научно-обоснованных технологий декарбонизации (на примере Чеченской Республики)».

ACKNOWLEDGEMENTS

Part of the work was carried out within the framework of the state task of Academician M.D. Millionshchikov GSOTU: No. FZNU-2021-0011 “Study of sequestration and emission potential of the carbon landfill “EcoGrozny” and development of scientifically based decarbonization technologies (on the example of the Chechen Republic)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас особо охраняемых природных территорий Санкт-Петербурга. Отв. ред. В.Н. Храмов, Т.В. Ковалева, Н.Ю. Нацваладзе. СПб.: Марафон, 2013. 176 с.
2. *Виноградов Б.В.* Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.
3. Временная методика по составлению карт пластики рельефа крупного и среднего масштаба. Методические рекомендации. Степанов И.Н., Абдуназаров У.К., Брынских М.Н. и др. Пушино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1984. 20 с.
4. *Гуня А.Н.* Мониторинг высокогорных территорий с использованием наземных и аэрокосмических снимков (на примере национального парка «Приэльбрусье»). Дис. канд. геогр. н. М., 1990. 180 с.
5. *Исаченко Г.А., Резников А.И.* Динамика ландшафтов тайги Северо-Запада Европейской России. СПб.: СПбГУ, 1996. 166 с.
6. *Исаченко Г.А.* Методы полевых ландшафтных исследований и ландшафтно-экологическое картографирование. СПб.: СПбГУ, 1999. 112 с.
7. *Колбовский Е.Ю.* Геоинформационное моделирование и картографирование ландшафтных местоположений. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2016. Т. 60. № 5. С. 20–24.
8. *Колбовский Е.Ю.* ГИС-моделирование в геоэкологии: опыт, достижения, проблемы и перспективы. Мировая экологическая повестка и Россия: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием (16–18 ноября 2020 г., Москва). М.: МГУ, 2020. С. 269–275.
9. *Ласточкин А.Н.* Системно-морфологическое основание наук о Земле: Геотопология, структур. география и общ. теория геосистем. СПб.: СПбГУ, 2002. 762 с.
10. *Степанов И.Н.* Теория пластики рельефа и новые тематические карты. М.: Наука, 2006. 230 с.
11. *Солнцев Н.А.* Учение о ландшафте. Избранные труды. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 384 с.
12. *Солнцев В.Н.* Системная организация ландшафтов. М.: Мысль, 1981. 239 с.
13. *Майер-Шенбергер В, Кукьер К.* Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. М.: ООО «Манн, Иванов и Фербер», 2014. 178 с.
14. *Шарый П.А.* Геоморфометрия в науках о земле и экологии, обзор методов и приложений. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2006. Т. 8. № 2. С. 458–473.
15. *Bailey R.G.* Ecoregions: The Ecosystem Geography of the Oceans and Continents. New York: Springer, 1998. 176 p. DOI: 10.2307/4003552.
16. *Bailey R.G.* Ecosystem Geography. From Ecoregions to Sites. New York: Springer-Verlag, 2009. 251 p. DOI: 10.5860/choice.47-6222.
17. *Boehner J., Selige, T.* Spatial Prediction of Soil Attributes Using Terrain Analysis and Climate Regionalization. SAGA – Analysis and Modelling Applications, Goettinger Geographische Abhandlungen, 2006. V. 115. P. 13–27.

18. *Burrough P.A., van Gaans P.F.M., MacMillan R.A.* High-resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000. V. 113. No. 1 P. 37–52. DOI: 10.1016/S0165-0114(99)00011-1.
19. *De Reu J., Bourgeois J., Bats M., Zwertvaegher A., Gelorini V., De Smedt P., Chu W., Antrop M., De Maeyer P., Finke P.* Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 2013. V. 186. P. 39–49. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.12.015.
20. *Evans I.S.* Geomorphology and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*, 2012. V. 137. No. 1. P. 94–106. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.09.029.
21. *Evans I.S., Hengl T., Gorsevski P.* Applications in Geomorphology. In: T. Hengl, H.I. Reuter (eds) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2009. V. 33. P. 497–525. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00022-6.
22. *Grekousis G.* *Spatial Analysis Methods and Practice: Describe – Explore – Explain through GIS*. New York, NY: Cambridge University Press, 2020. 448 p. DOI: 10.1017/9781108614528.
23. *Florinsky I.V.* Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009. V. 23. No. 2. P. 213–231. DOI: 10.1080/13658810802527499.
24. *Florinsky I.V.* An illustrated introduction to general geomorphometry. *Progress in Physical Geography*, 2017. V. 41. No. 6. P. 723–752. DOI: 10.1177/0309133317733667.
25. *Hansen M.C., Potapov P.V., Pickens A., Tyukavina A., Hernandez Sern, A., Zalles, V., Turubanova S., Kommareddy I., Stehman S.V., Song X-P.* Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data. *Environmental Research Letters*, 2022. V. 17. No. 3. P. 33–74. DOI: 10.1088/1748-9326/ac46ec.
26. *Hengl T., MacMillan R.A.* Geomorphometry — A Key to Landscape Mapping and Modelling. In *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*. Elsevier, 2009. V. 33. P. 433–460. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00019-6.
27. *Iwahashi J., Pike R.* Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 2007. V. 86. No. 3. P. 409–440. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.09.012.
28. *Jasiewicz J., Netzel P., Stepinski T.F.* Landscape similarity, retrieval, and machine mapping of physiographic units. *Geomorphology*, 2014. V. 221. P. 104–112. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.06.011.
29. *Jasiewicz J., Stepinski, T.F.* Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 2013. V. 182. P. 147–156. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.11.005.
30. *Kheir R.B., Bocher P.K., Greve M.B., Greve M.H.* The application of GIS based decision-tree models for generating the spatial distribution of hydromorphic organic landscapes in relation to digital terrain data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, V. 14. No. 6. P. 847–857. DOI: 10.5194/HESS-14-847-2010.
31. *Lowell K.E.* Differences between ecological land type maps produced using GIS or manual cartographic methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990. V. 56. No. 2. P. 169–173.
32. *Maxwell A.E., Warner T.A., Fang F.* Implementation of machine-learning classification in remote sensing: an applied review. *International Journal of Remote Sensing*, 2018. V. 39. No. 9. P. 2784–2817. DOI: 10.1080/01431161.2018.1433343.
33. *Memarsadeghi N., Mount D.M., Netanyahu N.S., Le Moigne J.* A Fast Implementation of the ISODATA Clustering Algorithm. *International Journal of Computational Geometry and Applications*, 2007. V. 17. No. 1. P. 71–103. DOI: 10.1142/S0218195907002252.
34. *Sayre R., Comer P., Hak J., Josse C., Bow J., Warner H. et al.* *A New Map of Standardized Terrestrial Ecosystems of Africa*. Washington, DC: Association of American Geographers, 2013. 47 p.
35. *Schmidt J., Hewitt A.* Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma*, 2004. V. 121. No. 3–4. P. 243–256. DOI: 10.1016/j.geoderma.2003.10.008.

36. *Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002. V. 107. P. 1–32. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7.
37. *Wilson J.P., Gallant J.C.* Primary Topographic Attributes. In: Wilson J.P., Gallant J.C. (Eds.): *Terrain Analysis: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 2000. P. 51–85.
38. *Wilson J.P.* *Environmental Applications of Digital Terrain Modeling*. Oxford. John Wiley & Sons Ltd, 2018. 321 p. DOI: 10.1002/9781118938188.
39. *Zhang W., Miller P.A., Smith B., Wania R., Koenigk T., Döscher R.* Tundra shrubification and tree-line advance amplify arctic climate warming: Results from an individual-based dynamic vegetation model. *Environmental Research Letters*, 2013. V. 8. No. 3. P. 1–10. DOI: 10.1088/1748-9326/8/3/034023.
40. *Zhang Z., Zimmermann N.E., Kaplan J.O., Poulter B.* Modeling spatiotemporal dynamics of global wetlands: Comprehensive evaluation of a new sub-grid TOPMODEL parameterization and uncertainties. *Biogeosciences*, 2016. V. 13. No. 5 P. 1387–1408. DOI: 10.5194/BG-13-1387-2016.

REFERENCES

1. Atlas of specially protected natural territories of St. Petersburg, ed. V.N. Khramtsov, T.V. Kovaleva, N.Y. Natsvaladze. St. Petersburg: Marathon, 2013. 176 p. (in Russian).
2. *Bailey R.G.* *Ecoregions: The Ecosystem Geography of the Oceans and Continents*. New York: Springer, 1998. 176 p. DOI: 10.2307/4003552.
3. *Bailey R.G.* *Ecosystem Geography. From Ecoregions to Sites*. New York: Springer-Verlag, 2009. 251 p. DOI: 10.5860/choice.47-6222.
4. *Boehner J., Selige, T.* Spatial Prediction of Soil Attributes Using Terrain Analysis and Climate Regionalization. *SAGA – Analysis and Modelling Applications, Goettinger Geographische Abhandlungen*, 2006. V. 115. P. 13–27.
5. *Burrough P.A., van Gaans P.F.M., MacMillan R.A.* High-resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000. V. 113. No. 1 P. 37–52. DOI: 10.1016/S0165-0114(99)00011-1.
6. *De Reu J., Bourgeois J., Bats M., Zwertvaegher A., Gelorini V, De Smedt P., Chu W., Antrop M., De Maeyer P., Finke P.* Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 2013. V. 186. P. 39–49. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.12.015.
7. *Evans I.S.* Geomorphology and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*, 2012. V. 137. No. 1. P. 94–106. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.09.029.
8. *Evans I.S., Hengl T. Gorsevski P.* Applications in Geomorphology. In: T. Hengl, H.I. Reuter (eds) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2009. V. 33. P. 497–525. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00022-6.
9. *Florinsky I.V.* An illustrated introduction to general geomorphometry. *Progress in Physical Geography*, 2017. V. 41. No. 6. P. 723–752. DOI: 10.1177/0309133317733667.
10. *Florinsky I.V.* Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009. V. 23. No. 2. P. 213–231. DOI: 10.1080/13658810802527499.
11. *Grekousis G.* *Spatial Analysis Methods and Practice: Describe – Explore – Explain through GIS*. New York, NY: Cambridge University Press, 2020. 448 p. DOI: 10.1017/9781108614528.
12. *Gunya A.N.* Monitoring of high-altitude territories using ground and aerospace images (on the example of the National Park “Elbrus”). PhD thesis in geography. Moscow, 1990. 180 p. (in Russian).
13. *Hansen M.C., Potapov P.V., Pickens A., Tyukavina A., Hernandez Sern, A., Zalles, V., Turubanova S., Kommareddy I., Stehman S.V., Song X-P.* Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data. *Environmental Research Letters*, 2022. V. 17. No. 3. P. 33–74. DOI: 10.1088/1748-9326/ac46ec.

14. *Hengl T., MacMillan R.A.* Geomorphometry – A Key to Landscape Mapping and Modelling. In *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*. Elsevier, 2009. V. 33. P. 433–460. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00019-6.
15. *Isachenko G.A.* Methods of field landscape research and landscape-ecological mapping. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 1999. 112 p. (in Russian)
16. *Isachenko G.A., Reznikov A.I.* Dynamics of taiga landscapes of the North-West of European Russia. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 1996. 166 p. (in Russian).
17. *Iwahashi J., Pike R.* Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 2007. V. 86. No. 3. P. 409–440. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.09.012.
18. *Jasiewicz J., Netzel P., Stepinski T.F.* Landscape similarity, retrieval, and machine mapping of physiographic units. *Geomorphology*, 2014. V. 221. P. 104–112. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.06.011.
19. *Jasiewicz J., Stepinski, T.F.* Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 2013. V. 182. P. 147–156. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.11.005.
20. *Kheir R.B., Bøcher P.K., Greve M.B., Greve M.H.* The application of GIS based decision-tree models for generating the spatial distribution of hydromorphic organic landscapes in relation to digital terrain data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, V. 14. No. 6. P. 847–857. DOI: 10.5194/HESS-14-847-2010.
21. *Kolbovsky E.Yu.* Geoinformation modeling and mapping of landscape locations. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2016. V. 60. No. 5. P. 20–24 (in Russian).
22. *Kolbovsky E.Yu.* GIS modeling in geocology: experience, achievements, problems and prospects. *The World Environmental Agenda and Russia: Materials of the All-Russian Scientific Conference with International Participation (November 16–18, 2020, Moscow)*, MSU, 2020. P. 269–275 (in Russian).
23. *Lastochkin A.N.* System and morphological basis of Earth sciences: (Geotopology, structural geography and general theory of geosystems). St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2002. 762 p. (in Russian),
24. *Lowell K.E.* Differences between ecological land type maps produced using GIS or manual cartographic methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990. V. 56. No. 2. P. 169–173.
25. *Maxwell A.E., Warner T.A., Fang F.* Implementation of machine-learning classification in remote sensing: an applied review. *International Journal of Remote Sensing*, 2018. V. 39. No. 9. P. 2784–2817. DOI: 10.1080/01431161.2018.1433343.
26. *Mayer-Schoenberger V, Kukier K.* Big data. A revolution that will change the way we live, work and think. Moscow: LLC “Mann, Ivanov and Ferber”, 2014. 178 p. (in Russian).
27. *Memarsadeghi N., Mount D.M., Netanyahu N.S., Le Moigne J.* A Fast Implementation of the ISODATA Clustering Algorithm. *International Journal of Computational Geometry and Applications*, 2007. V. 17. No. 1. P. 71–103. DOI: 10.1142/S0218195907002252.
28. *Sayre R., Comer P., Hak J., Josse C., Bow J., Warner H. et al.* A New Map of Standardized Terrestrial Ecosystems of Africa. Washington, DC: Association of American Geographers, 2013. 47 p.
29. *Schmidt J., Hewitt A.* Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma*, 2004. V. 121. No. 3–4. P. 243–256. DOI: 10.1016/j.geoderma.2003.10.008.
30. *Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002. V. 107. P. 1–32. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7.
31. *Shary P.A.* Geomorphometry in earth sciences and ecology, review of methods and applications. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2006. V. 8. No. 2. P. 458–473. (in Russian).
32. *Solntsev N.A.* The doctrine of the landscape. Selected works. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2001. 384 p. (in Russian).

33. *Solntsev V.N.* System organization of landscapes. Moscow: Mysl, 1981. 239 p. (in Russian).
 34. *Stepanov I.N.* Theory of relief plasticity and new thematic maps. Moscow: Nauka, 2006. 230 p. (in Russian).
 35. Temporary methodology for mapping relief plasticity of large and medium scale. Methodological recommendations. Stepanov I.N., Abdunazarov U.K., Brynskikh M.N. et al. Pushchino: ONTI NCBI of the USSR Academy of Sciences, 1984. 20 p. (in Russian).
 36. *Vinogradov B.V.* Fundamentals of landscape ecology. Moscow: GEOS, 1998. 418 p. (in Russian).
 37. *Wilson J.P.*, *Gallant J.C.* Primary Topographic Attributes. In: Wilson J.P., Gallant J.C. (Eds.): *Terrain Analysis: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 2000. P. 51–85.
 38. *Wilson J.P.* *Environmental Applications of Digital Terrain Modeling*. Oxford. John Wiley & Sons Ltd, 2018. 321 p. DOI: 10.1002/9781118938188.
 39. *Zhang W.*, *Miller P.A.*, *Smith B.*, *Wania R.*, *Koenigk T.*, *Döscher R.* Tundra shrubification and tree-line advance amplify arctic climate warming: Results from an individual-based dynamic vegetation model. *Environmental Research Letters*, 2013. V. 8. No. 3. P. 1–10. DOI: 10.1088/1748-9326/8/3/034023.
 40. *Zhang Z.*, *Zimmermann N.E.*, *Kaplan J.O.*, *Poulter B.* Modeling spatiotemporal dynamics of global wetlands: Comprehensive evaluation of a new sub-grid TOPMODEL parameterization and uncertainties. *Biogeosciences*, 2016. V. 13. No. 5 P. 1387–1408. DOI: 10.5194/BG-13-1387-2016.
-