

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 911.2(4)

ПРОБЛЕМЫ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИРОДНО-ЗОНАЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ В ГЕОГРАФИИЕ.Ю. Колбовский¹, Н.Н. Алексеева², А.И. Банчева³, О.А. Климанова⁴¹⁻⁴ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии мира и геоэкологии*¹ *Вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: kolbowski@mail.ru*² *Доцент, канд. геогр. наук; e-mail: nalex01@mail.ru*³ *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ban-sai@mail.ru*⁴ *Доцент, канд. геогр. наук; e-mail: oxkl@yandex.ru*

Природная зона – одно из базовых понятий физической географии, отражающее горизонтальную дифференциацию ландшафтной оболочки от экватора к полюсам. Разнообразие глобальных геопространственных данных и совершенствование методов автоматической компьютерной классификации открывают новые возможности для применения алгоритмов геоинформационного анализа для дифференциации суши по зонально-климатическим условиям. Цель статьи – выделить природно-зональные границы средствами геоинформационного моделирования с использованием глобальных климатических данных, а также выявить ограничения и сложности, возникающие при неконтролируемой классификации. В работе использовались нормализованные показатели из глобальной базы климатических данных Эдинбургского университета, составленной на основе WorldClim. На первом этапе методом анализа главных компонент обоснован набор значимых климатических параметров, необходимых для моделирования зонально-климатических группировок природных комплексов (годовая амплитуда температур, сезонность ежемесячных средних температур, годовая сумма среднесуточных температур выше 0°C, годовая сезонность осадков, индекс аридности Торнтвейта и сезонность потенциальной эвапотранспирации – всего 6 показателей). Далее проведена неконтролируемая классификация указанных параметров по разному количеству классов (15, 22, 72). Для получения картины, сходной с глобальной природно-зональной дифференциацией, в модели использовано 22 класса. Сравнение новых зонально-климатических рубежей, полученных в результате моделирования, с границами природных зон на картах, составленных на основе иных методических подходов, проведено на примере Европы. Новые границы в целом отражают основные закономерности поясно-зональной дифференциации территории и могут служить основой для дальнейшей типологии ландшафтов средствами геоинформационного моделирования. В ходе исследования определены основные методологические ограничения геоинформационного моделирования природных зон на глобальном и материковом уровнях. Ограничения кластерного анализа для мелкомасштабного картографирования зонально-климатических группировок природных комплексов связаны также со сложностью выбора оптимального числа классов для получения адекватной визуализации пространственной структуры природных зон, а также с фактором «равного вклада» всех используемых климатических переменных в моделировании. Показано, что при реализации автоматических алгоритмов моделирования помимо климатических параметров (даже в разнообразных комбинациях) необходимо привлечение других геопространственных данных. Несомненным преимуществом подхода является воспроизводимость алгоритма классификации и возможность получения на выходе данных требуемой степени детальности в зависимости от конкретных задач геоэкологических исследований.

Ключевые слова: природная зональность, зонально-климатические рубежи, климатические данные, геоинформационное моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Природная зональность – особая форма территориальной дифференциации ландшафтной оболочки Земли, выраженная в последовательном изменении природных условий и ландшафтов от экватора к полюсам [Мильков, 1959]. Различия в

природных комплексах, обусловленные неравномерным распределением тепла и влаги по земной поверхности, анализировались выдающимися естествоиспытателями прошлого – Ч. Дарвином, А. Уоллесом, А. Гумбольдтом и др. Концепция «зон природы» как сложных комплексов, объеди-

няющих климатические условия с типами почв и растительных сообществ, впервые предложенная В.В. Докучаевым [Докучаев, 1899], на протяжении XX в. детально разрабатывалась в нашей стране (Л.С. Берг, А.А. Григорьев, М.И. Будыко, Г.Д. Рихтер, И.П. Герасимов, Е.Н. Лукашова, А.М. Рябчиков, А.Г. Исаченко и др.) и за рубежом (К. Тролль, Л. Холдридж, Р. Бейли и др.).

С позиций ландшафтоведения природные (ландшафтные) зоны – «типы природно-территориальных комплексов, различающиеся главным образом вследствие неравномерного распределения тепла и влаги на поверхности Земли» [Лукашова, Игнатьев, 1964, с. 293], название природных зон традиционно дается по типу доминирующей растительности. В настоящее время они рассматриваются как ландшафтные сообщества с однородными в масштабе исследования климатогенными и биогенными природными компонентами [Романова и др., 2015]. В разное время отечественными исследователями выделялось от 24 [Григорьев, Будыко, 1956] до 43 [Романова и др., 2015] природных зон.

Авторы первых карт природных зон полагали, что зональная дифференциация определяется различием в соотношении тепла и влаги, которое можно представить в виде количественных коэффициентов: радиационного индекса сухости [Григорьев, Будыко, 1956], гидротермического коэффициента Селянинова [Лукашова, Игнатьев, 1964] и др. По мере накопления знаний и использования объективно измеряемых климатических показателей оказалось, что определяющими дискретность феномена и «прорисовывающими» границы являются более сложные производные факторы, тем или иным способом выражающие сочетание тепла и влаги на фоне внутригодового климатического цикла, например количество осадков в теплый период года, изменение индексов аридности и влажности по сезонам, средние минимальные температуры воздуха за период их положительных значений и т. п. Существенную роль в зонально-климатической дифференциации играет соотношение различных гидротермических фаз в течение вегетационного периода, определяющих специфику растительных группировок, почв, ежегодной биологической продуктивности и пр. [Isachenko, 1998]. Так, фазы теплообеспеченности вегетационного периода (выделено семь типов) и влагообеспеченности (четыре типа) и их продолжительность образуют уникальные сочетания, формирующие зонально-климатическое разнообразие типов ландшафтов/экосистем. Различные климатические показатели используются для расчета первичной фитопродуктивности ландшафтов [Дьяконов, Шиловцев, Харитонов, 2005].

Очевидно, что более детальное понимание зависимостей между климатом и растительностью (как наиболее физиономичным компонентом ландшафта) одновременно с накоплением разнородных климатических данных глобального охвата мотивируют исследователей обращаться к вопросу создания доказательной современной средствами ГИС-моделирования картографической модели, отражающей связь между абиогенными (в первую очередь, климатическими) и биогенными (растительность) компонентами ландшафтной оболочки. Результаты подобного моделирования при помощи инструментов кластеризации ISOData изложены в работе [Metzger et al., 2013], где на основе использования климатических данных глобального охвата проведено экологическое районирование суши. При этом авторы указанного исследования не ставили задачу выделения легко распознаваемых биомов, а предлагали вариант дифференциации (стратификации) суши на относительно схожие по биоклиматическим параметрам ареалы, пригодные для дальнейшего статистического анализа и моделирования. Отметим, что процедура стратификации основывается в большей степени на технических параметрах классов, а не на предварительно разработанных классификационных схемах. В связи с этим в данной работе цель ставится по-иному, а именно: возможно ли при помощи средств геоинформационного моделирования на основе глобальных климатических данных решить проблему выделения природно-зональных границ в соответствии с принятыми в отечественной географии подходами, а также выявить ограничения и сложности, возникающие при неконтролируемой классификации. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) обоснование набора значимых климатических параметров (переменных) методом анализа главных компонент, необходимых для моделирования зонально-климатических группировок природных комплексов; 2) проведение неконтролируемой классификации нормализованных климатических переменных для выявления значимых зонально-климатических рубежей. В отличие от стратификации [Metzger et al., 2013], изначально были определены условия моделирования с выделением определенного (заданного) числа категорий; 3) сравнение новых зонально-климатических рубежей, полученных в результате моделирования, с границами природных зон на картах, составленных на основе иных методических подходов; 4) выявление преимуществ и ограничений геоинформационного моделирования для мелкомасштабных ландшафтных исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методологические подходы к выделению природных зон. В настоящее время при выделении природных зон и близких им единиц, используемых в зарубежной литературе (ecological zones, environmental zones, ecological land units), существует два основных подхода: первый определяет климат как первичный параметр классификации, второй в качестве такового выбирает биогеографические особенности территории. К исследованиям первой группы относится, например, одна из первых схем зонально-климатического районирования суши Земли, предложенная В. Кёппеном в 1900 г. и обновленная на основе современных климатических данных [Kottek et al., 2006]. Эта же классификация используется ФАО для выделения экологических зон мира (5 доменов, 20 типов зон) [Global Ecological Zoning..., 2001]. Среди других классификационных подходов, отражающих связь между климатом и зональной растительностью, – схема жизненных зон мира Л. Холдриджа (1947, 1967), схема географической зональности на основе радиационного индекса сухости А.А. Григорьева и М.И. Будыко (1956), дифференциация ландшафтных зон на основе соотношения теплообеспеченности и увлажнения А.Г. Исаченко (1991) и др.

Другой подход в членении ландшафтной оболочки на относительно гомогенные ареалы, определяемые в том числе и климатом, основан на приоритете выделения биогеографических различий и распределения видов [Olson et al., 2001]. Этот подход тесно связан с разделением суши на крупные относительно гомогенные (по растительности и животному миру) ареалы, известные как биомы, предложенные американскими экологами Ф. Клементом и В.Э. Шелфордом в 1939 г. [Clement, Shelford, 1939]. При этом биомы «вложены» в климатические пояса, что позволяло Г. Вальтеру ссылаться на биомы как на зонобиомы, в отличие от оробиомов и педобиомов, формирование которых обусловлено высотным положением в горах и эдафическими условиями. Зонобиом позиционируется как типологическая и кластерная сущность, границы которой задаются климатическими переменными. Классификационная схема Г. Вальтера [Walter, 1968] включает девять основных типов зонобиомов, границы которых определяются условиями увлажнения и холодового стресса (наиболее низкими температурами), детерминирующими типы зональной растительности [Walter, Breckle, 2002]. Схожий подход отражает и концепция экологических зон (экозон) / экорегионов как региональных выделов, представляющих собой относительно крупный участок суши или акватории с относительно однородным биотическим сообществом [Bailey,

2009]. Она получила широкое применение в природоохранной деятельности и используется во многих проектах для мониторинга биоразнообразия.

В эпоху традиционного картографирования границы природных зон, как и многих других «синтетических» феноменов, выделялись экспертно-интуитивно, с мануальным конфигурированием границ. В этом случае важнейшее значение имела квалификация эксперта, проводившего сопряженный анализ основных ландшафтообразующих факторов, поэтому примеры таких классификаций и в отечественной, и в зарубежной науке крайне немногочисленны. К ним можно отнести все упомянутые выше примеры классификаций, появившиеся примерно до начала 1990-х гг. Наряду с неоспоримыми достоинствами данных карт, к числу которых относится прежде всего огромная работа по обобщению и систематизации материала, их важным недостатком является отсутствие четко прописанных критериев выделения ландшафтных единиц, что делает крайне затруднительным повторение алгоритмов картографирования.

После появления ГИС-технологий в ходе геоинформационного моделирования природно-экологических единиц во многом воспроизводились подходы экспертно-мануального картографирования [Eetvelde, Antrop, 2009], в частности наложение и синтез слоев. Такой метод применен при составлении карты экосистем Южной Америки, на которой в результате наложения (комбинирования с конкатенацией индексов) нескольких предварительно классифицированных растров – абсолютной высоты, типов мезоформ рельефа, основных типов подстилающих пород, биоклиматов, земельного покрова – выделено 659 классов экосистем [Sayre et al., 2008]. Аналогичным образом составлена Глобальная карта экосистем суши, на которой выделено 3923 класса экосистем (Ecological Land Units) из первоначально полученных 48 872 уникальных комбинаций грид-кодов. Каждая выделенная единица отражает четыре характеристики в последовательности, по мнению авторов, учитывающие значимость входных параметров для характеристики экосистем (биоклимат – рельеф – литология – земельный покров) [Sayre et al., 2014].

Р. Бейли [Bailey, 1998] и К. Лайэлл [Lowell, 1990] отмечали, что, хотя наложение карт может быть полезным для идентификации экосистем, этот подход имеет недостатки: несовпадающий исходный масштаб слоев, несоответствующие границы, произвольное число классов (таксонов) разных тематик (которые изначально подбирались под другие задачи). В целом опыт использования алгоритма оверлея показал, что этот метод мало пригоден для делимитации сложных интегральных феноменов, к каковым относятся и геосистемы всех иерархиче-

ских рангов – начиная от природных зон и заканчивая ландшафтами. Когда этот метод используется, то «поверх» ландшафтных растров иногда проводятся новые границы, очерченные вручную путем целостной интерпретации полученных структур. Их проведение дополнительно корректируется с помощью спутниковых изображений. Далее «холистическая» пространственная структура, сформированная на основе сетки ландшафтных единиц, описывается с использованием ландшафтных метрик, после чего путем иерархической кластеризации определяются типы ландшафтов. Такой трехступенчатый подход применялся, например, в процессе составления ландшафтной карты Бельгии [Eetvelde, Antrop, 2009].

Кластерный анализ используется как способ полуавтоматического моделирования и классификации многофакторных сущностей, он применялся для решения данной задачи рядом авторов [Hargrove, Hoffman, 2005; Metzger et al., 2013]. В указанных выше источниках использован неконтролируемый метод классификации (ISODATA – Iterative Self Organizing Data Analysis), автоматически разбивающий пиксели композитного растрового слоя на определенное число таксонов («классов»), имеющих сходные «спектры» по всей совокупности использованных входных переменных.

Как и все другие методы неконтролируемой классификации, ISODATA-кластеризация чувствительна к следующим характеристикам входных данных:

- выбор переменных (набор используемых показателей);
- общее число переменных;
- использование исходных («сырых») или обработанных (нормализованных либо стандартизированных) данных;
- наличие взаимной корреляции (ковариации) между переменными.

Очевидно, что в этом перечне важнейшим является собственно выбор показателей – характеристик, которые служат входными данными для классификации. На сегодняшний день в распоряжении исследователей имеется несколько наборов данных глобального охвата, различающихся по составу и характеру обработки переменных:

- реанализы, обеспечивающие многолетние сеточные архивы климатических данных за 1970–2000 гг. (например, WorldClim version 2.1) [Fick, Hijmans, 2017];
- нормализованные и стандартизованные биоклиматические данные (например, база Global Environmental Stratification, разработанная университетом Эдинбурга).

Для задач нашего исследования первоначально были использованы биоклиматические данные Эдинбургского университета [Metzger et al., 2013],

содержащие 42 переменные. Они отличаются от данных WorldClim не только большим набором показателей (здесь рассчитаны дополнительные ограничивающие или критические для выделения природных зон факторы), но и тем обстоятельством, что все переменные (за исключением абсолютной высоты) подверглись либо нормализации (с использованием диапазона значений), либо стандартизации (с использованием стандартных отклонений). Исходя из этого, именно эти данные были выбраны для параметризации.

Алгоритм моделирования. На первом этапе из указанной базы данных экспертным путем были отобраны 15 климатических переменных, предпочтение отдавалось параметрам двух типов: 1) характеризующим тепло- и влагообеспеченность и 2) соотношение тепла и влаги. Выбор именно таких параметров был связан с гипотезой исследования – построение границ природных зон средствами ГИС-моделирования возможно на основе глобальных климатических данных.

Для определения вклада каждой из 15 климатических переменных в делимитацию зонально-климатических рубежей и выявления потенциальной взаимосвязи между переменными был использован метод анализа главных компонент (моделирование проводилось в программном пакете ArcMAP 10.5). По результатам анализа была построена матрица корреляции, показывающая возможные взаимосвязи между указанными переменными (переменная «абсолютная высота» не учитывалась) (табл.). Как и следовало ожидать, параметры, послужившие основой для расчета других характеристик, показали коэффициент ковариации с ними выше 0,85. Среди таких параметров (рис. 1):

- среднегодовая температура и количество месяцев со средней температурой выше 10°C (четыре взаимосвязанных показателя);
- средняя температура самого холодного месяца, средняя температура самого теплого месяца, годовое количество осадков, плювиотермический коэффициент Эмбержера (три взаимосвязанных показателя);
- годовая сумма среднесуточных температур более 0°C, количество осадков за месяцы со среднемесячными температурами выше 0°C, индекс аридности Торнтвейта (два взаимосвязанных показателя).

По итогам анализа главных компонент на следующем этапе моделирования были выбраны шесть переменных:

- годовая амплитуда температур;
- сезонность ежемесячных средних температур;
- годовая сумма среднесуточных температур более 0°C;
- годовая сезонность осадков;
- индекс аридности Торнтвейта;

Матрица корреляции для климатических переменных (фрагмент)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,000	−0,482	−0,314	0,978	0,933	0,884	0,945	−0,040
2	−0,482	1,000	0,938	−0,377	−0,742	−0,040	−0,264	−0,502
3	−0,314	0,938	1,000	−0,192	−0,580	0,128	−0,087	−0,590
4	0,978	−0,377	−0,192	1,000	0,883	0,927	0,982	−0,137
5	0,933	−0,742	−0,580	0,883	1,000	0,673	0,811	0,167
6	0,884	−0,040	0,128	0,927	0,673	1,000	0,947	−0,333
7	0,945	−0,264	−0,087	0,982	0,811	0,947	1,000	−0,210
8	−0,040	−0,502	−0,590	−0,137	0,167	−0,333	−0,210	1,000

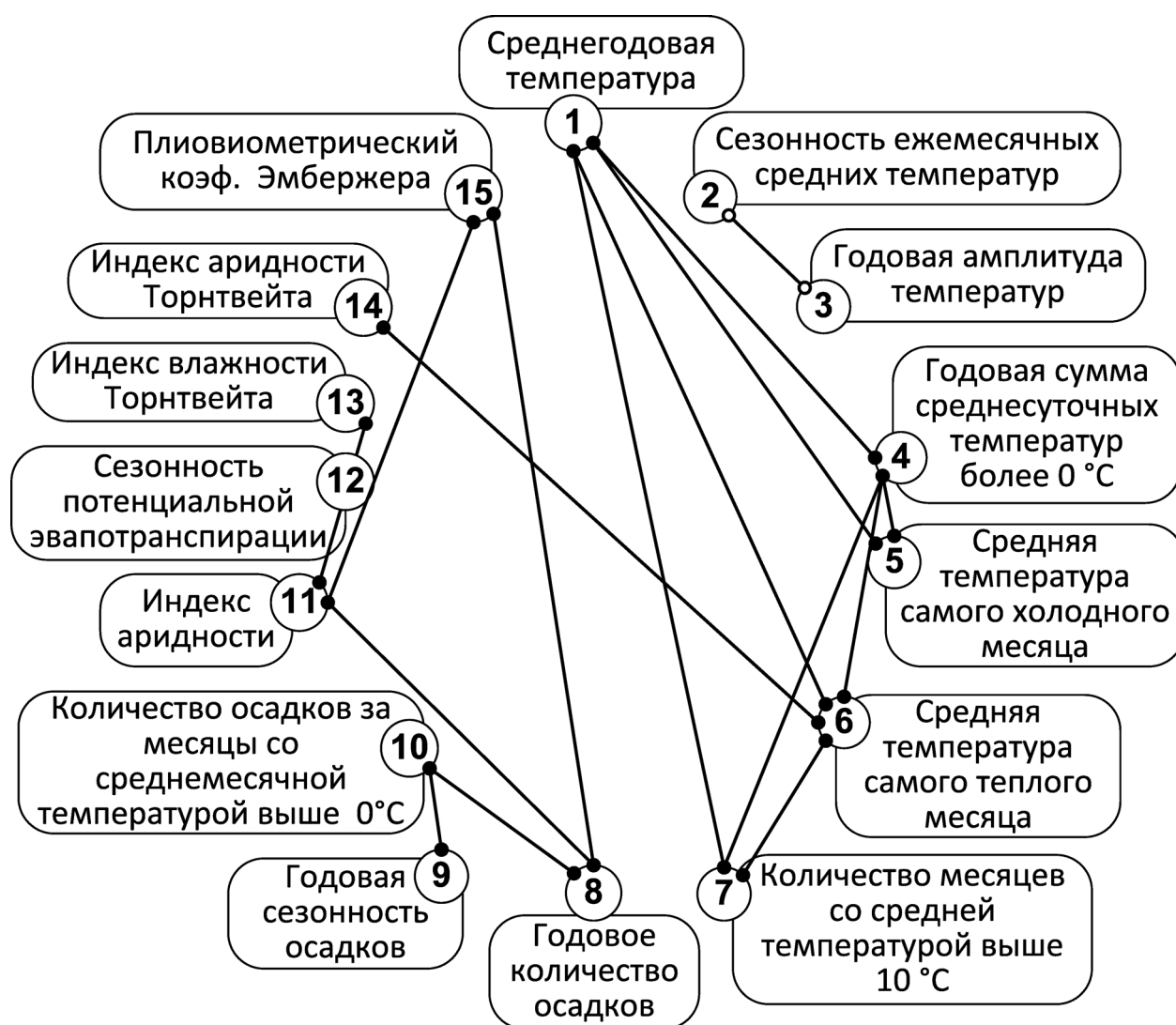


Рис. 1. Взаимосвязи между переменными по результатам анализа главных компонент для 15 климатических переменных

Fig. 1. Relationships between variables as a result of principal components analysis for 15 climate variables

– сезонность потенциальной эвапотранспирации. на годовая сумма среднесуточных температур более 0°C, которая определяет общую теплообеспечен-

К пяти независимым переменным была добавле-

ность территории – важный дифференцирующий показатель для географических поясов. Отметим, что четыре из шести переменных (2–5) использовались М. Метцгером с соавторами для процедуры глобальной «экологической классификации» (Environmental stratification), в результате которой было выделено 18 природно-экологических зон (environmental zones) и 125 групп внутри них [Metzger et al., 2013]. В нашем исследовании перечень переменных расширен.

Далее переменные использовались в процедуре неконтролируемой классификации (Iso Cluster Unsupervised Classification пакета ArcMAP 10.5)¹. При использовании данного метода решающее значение для результата имеет указываемое число кластеров (в данной работе кластеризация проводилась по 15, 22 и 72 классам); для получения корректной картины распределения целесообразно выбирать значение «ожидаемое число классов плюс один или плюс два». При большом разнообразии количества выделяемых природных (ландшафтных) зон на мировых картах² для инструмента неконтролируемой классификации нами было указано значение 22, которое позволило получить в целом генерализованную зонально-климатическую картину. Отметим, что количество кластеров устанавливается для конкретных задач экологических исследований эмпирическим путем [Ergüner et al., 2019].

Полученный растр для избавления от «информационного шума» был подвергнут генерализации с использованием инструментов «фокальная статистика» (опция Majority) и «удаление границ» Boundary Clean (опция Descent). Далее, для выявления физических значений полученных ареалов растр природных зон был переведен в векторную форму с попутным удалением всех полигонов площадью менее 6 км². Процедурой Dissolve были слиты все полигоны одного типа (класса), т. е. все множество превращено в 22 полигона.

¹ Отметим, что на предварительном этапе исследований авторы рассматривали разнообразные варианты (взвешенное и нечеткое наложение, нейронная сеть, дерево решений и т. д.), но их последовательный обзор, вероятно, представляет интерес для профильного ГИС-издания.

² На карте «Географические пояса и зоны» в монографии А.М. Рябчикова (1972) выделено 25 географических зон, на мировой карте «Географические пояса и зональные типы ландшафтов» (1988) – 29 природных зон, в монографии А.Г. Исаченко (1991) – 25 зональных групп ландшафтов, в монографии А.Г. Исаченко и А.А. Шляпникова (1989) – 20 зональных серий, в монографии А.Г. Исаченко (2008) – 28 ландшафтных зон, в разделе Э.П. Романовой в семитомнике «География, общество, окружающая среда» (2004) – 35 природных зон, на карте в статье Э.П. Романовой с соавторами (2015) – 43 природные зоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Верификация независимых показателей.

Шесть показателей, отобранных как независимые для последующей кластеризации, были классифицированы в пакете ArcMap для оценки их вклада в дифференциацию зонально-поясных ареалов (рис. 2). Очевидно, что одни параметры в большей мере определяют дифференциацию поясную, другие – секторную.

Так, показатель годовой амплитуды температур (см. рис. 2А) маркирует рубежи экваториального и субэкваториального поясов с наименьшими амплитудами, а также хорошо отражает смену секторов в умеренном и субтропическом поясах (от западно-приокеанических до резко континентальных), особенно на огромном пространстве Евразии. Зоны со значительными амплитудами соответствуют континентальным секторам на всех материках.

Дифференциация показателя сезонности ежемесечных средних температур по 10 классам позволяет выделить примерно те же закономерности, что и предыдущий показатель: также проявляется четкое секторное (с запада на восток) деление материков (особенно Западной и Восточной Европы), в то же время более обобщенно определяются районы экваториального и субэкваториальных поясов обоих полушарий.

Показатель «Годовая сумма среднесуточных температур выше 0°C» (см. рис. 2Б) отражает преимущественно широтные тепловые пояса Земли, осложненные проявлением высотной поясности в горах (за исключением Австралии). Хорошо прослеживаются южные границы бореального подпояса в Евразии и Северной Америке, границы субтропических поясов, в то же время в высоких широтах дифференцирующая роль этого фактора не проявляется.

Параметр годовой сезонности осадков имеет чрезвычайно сложное распределение, отражающее как секторные, так и поясные (широтные) закономерности. Так, на рис. 2В отчетливо виден восточно-приокеанический сектор в умеренном и субтропических поясах Северной Америки (равномерно обеспеченный как зимними фронтальными, так и летними муссонными осадками), а также смена гумидного климата атлантического типа в Западной Европе субгумидным, характерным для умеренно-континентального сектора. Выделяется также восточно-приокеанический сектор в тропическом поясе Южной Америки. В то же время на карте обнаруживается и широтная смена климатических условий: увеличение сезонности осадков с широтой местности четко проявляется в Сахаро-Сахельской зоне, на северо-западе Индийского субконтинента, где в этом направлении увеличивается продолжительность сухого сезона.

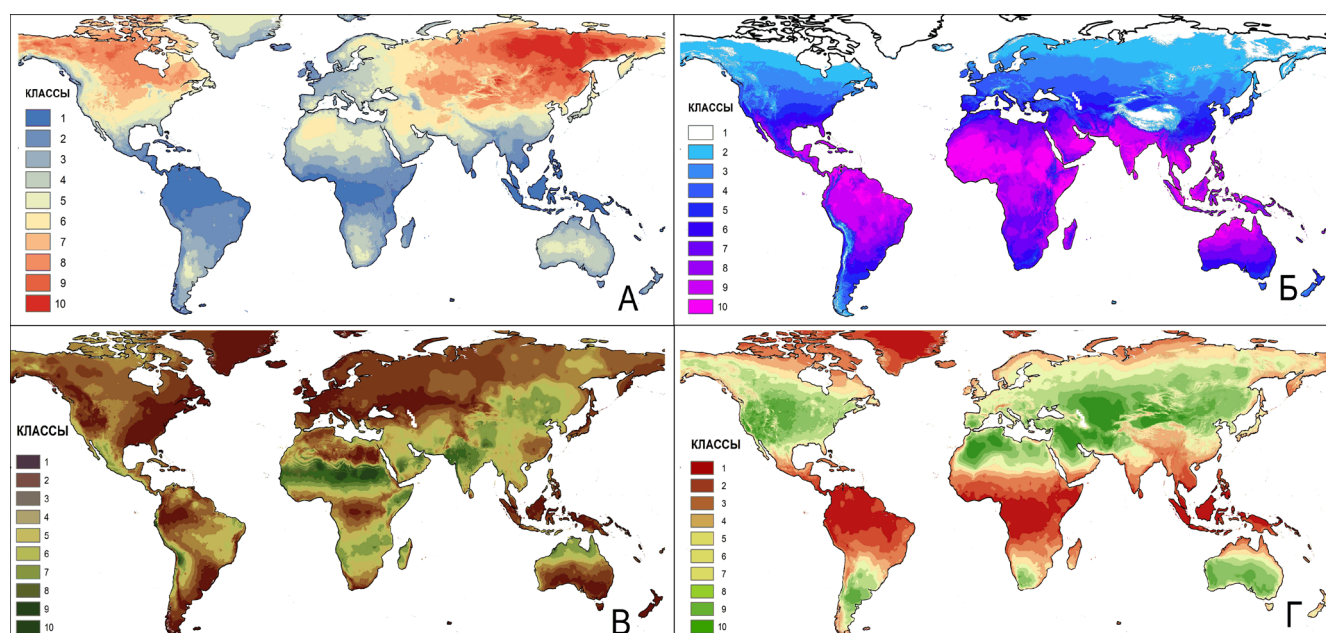


Рис. 2. Годовые стандартизированные значения величин, 10 классов – интервалы – «естественные границы»:

А – амплитуда температур; Б – сумма среднесуточных температур выше 0°C; В – сезонность осадков;

Г – сезонность потенциальной эвапотранспирации.

Расшифровка легенды:

Класс	А	Б	В	Г
1	1–15	0–9169	0–26	246–1322
2	16–21	9170–19 714	27–43	1323–2049
3	22–27	19 715–30 718	44–58	2050–2840
4	28–32	30 719–43 096	59–74	2841–3599
5	33–36	43 097–56 392	75–90	3600–4264
6	37–42	56 393–68 771	91–106	4265–4865
7	43–47	68 772–79 774	107–124	4866–5434
8	48–53	79 775–88 943	125–144	5435–5972
9	54–60	88 944–97 196	145–170	5973–6636
10	61–73	97 197–116 910	171–265	6637–8313

Fig. 2. Annual standardized values of parameters, 10 classes – intervals – “natural boundaries”: А – temperature amplitudes; Б – sums of mean daily temperatures above 0°C; В – seasonality of precipitation; Г – seasonality of potential evapotranspiration. For legend see the table above

Индекс аридности Торнтвейта маркирует в основном макрорегионы-экстремумы как в полярных, так и в тропических поясах земного шара. С его помощью легко дифференцируются безлесные аридные и семиаридные области, например сухие саванны в Африке и Азии, каатинга в Южной Америке, степи и пустыни Центральной Азии, пустынное «ядро» Австралии и пр. Выделяются и секторы с избыточным увлажнением – центрально-восточная часть Гренландии, а также запад Скандинавии, береговая и горная зоны Аляски и западной Канады.

Сезонность потенциальной эвапотранспирации (см. рис. 2Г), отражающая внутригодовое соотношение режимов тепла (поскольку фактическая эвапотранспирация в любой точке определяется

температурой) и влаги, конфигурирует как широтно-зональные, так и секторные закономерности, маркируя крупные характерные континентальные секторы во внутренних частях материков. В то же время очевидна большая дифференцирующая роль этого показателя в аридных и семиаридных областях переходных и континентальных секторов, чем в гумидных и семигумидных. Таким образом, каждая из шести переменных, выбранных для кластеризации, определенным образом влияет на дифференциацию природно-ландшафтных зон.

Картографическая модель природно-зональной дифференциации. Полученные в результате кластеризации шести ключевых переменных зонально-климатические рубежи сравнивались с по-

ясно-секторно-зональными границами на мировых и материковых картах, составленных ранее с использованием различных методических подходов. Поскольку объем статьи не позволяет провести анализ по всем материкам, остановимся на сравнении границ в пределах «ключевого макрорегиона» зарубежной Европы (рис. 3).

Для этого использовалось несколько карт: географические пояса и зональные типы ландшафтов зарубежной Европы [Романова, 2004] (см. рис. 3А), экологическое районирование зарубежной Европы [Metzger et al., 2005] (см. рис. 3Б), экологические зоны Европы ФАО [Global Ecological Zoning..., 2001] (см. рис. 3В). Известная иерархическая классификация ландшафтов Европы (European Landscape Classification, LANMAP), основанная на многоуровневой сегментации геопространственных данных, нами не учитывалась, так как слой биоклиматических данных, имевший более низкое пространственное разрешение, использовался авторами для типологии, а не для картографирования ландшафтных единиц [Mucher et al., 2010].

Полученная в результате кластеризации природно-зональная модель Европы отражает комбинацию условий по шести биоклиматическим переменным (см. рис. 3Г). Она не противоречит приведенным картам ни по простиранию большей части поясных и секторных границ, ни по основным природно-зональным рубежам. Полученным зональным группировкам были даны условные названия, принятые в российских типологических зональных классификациях.

Очевидно, что новые границы (см. рис. 3Г) отражают распределение зональных группировок природных комплексов точнее, чем на иных рассмотренных схемах. На всех картах с разной степенью детальности прослеживаются гумидные ландшафты приокеанического сектора суббореального подпояса (для них типичны буково-широколиственные леса), их смена семигумидными типами (дубово-широколиственные леса) на Среднеевропейской равнине в умеренно-континентальном секторе. Положение северной границы субтропиков совпадает с рубежом на карте экологического районирования Европы М. Метцгера (2005), особенно в пределах Паданской равнины и приморских районов Франции. Четко выделяются термофильные типы ландшафтов на юге субтропического пояса на Пиренейском полуострове и востоке Балкан. Детально отразилась высотная зональность высокогорий (Альпы, Пиренеи) и среднегорий (Карпаты, Шотландское нагорье). В то же самое время есть и некоторые расхождения с составленными ранее поясно-зональными схемами. Так, территория к югу от Луары, соответствующая зоне термофильных дубово-широколиственных лесов, попала в ту же биоклиматическую зону, что и широколиственные

лесостепи и степи Придунайских равнин. Запад Аквитании и Галисия оказались в условиях субтропического или переходного к нему климата. Заметим, что на карте экологических зон Европы (см. рис. 3Б) они выделяются в виде особой Лузитанской экозоны. Такого рода несоответствия отмечаются и в других работах [Metzger et al., 2005; Ergüner et al., 2019], что рассматривается авторами как стандартная ошибка. В данном случае, вероятно, она связана с неполным учетом (отбором) климатических параметров, которые адекватно фиксировали бы различия между хорошо обеспеченными теплом ландшафтами суббореального подпояса с гумидными, семигумидными и семиаридными условиями. Отметим, что изменение данных, используемых для кластеризации или процедуры классификации, может уточнить класс некоторых растров, но не приведет к изменению общей картины, отражающей пространственную структуру биоклиматических условий. Как показали аналогичные исследования, проведенные с использованием кластеризации для разных стран Европы [Bunce et al., 2002], основные экологические структуры, полученные на основе классификаций, стабильны независимо от деталей, относящихся к используемым переменным и алгоритмам.

Таким образом, границы, полученные в результате кластеризации климатических переменных, носят отчетливый поясно-зональный характер, в целом выявляют основные закономерности природно-климатической дифференциации Европы и могут служить для дальнейшей типологии ландшафтов с помощью геопространственного моделирования.

Результаты моделирования с увеличением числа выходных классов (например, до 72) в границах Европы с тем же набором из шести климатических переменных показали, что модель неплохо «работает» на территориях с дифференциацией форм мезорельефа (особенно это заметно в поясе герцинских низкогорий) и мозаичной морфолитогенной основой (например, в пределах Центрального массива). Здесь получилась весьма дробная структура группировок, при том что собственно растры рельефа в модели не использовались. В то же время распределение зонально-климатических группировок вдоль постепенных градиентов, где нет четких орографических границ (например, в европейской части России или на Среднеевропейской равнине), демонстрирует классическое широтное простираание с появлением целого набора «подзон», отражающих постепенную смену биоклиматических показателей. В горных областях увеличение числа классов приводит к дроблению привычных очертаний поясов высотной поясности, которые при мелкомасштабном традиционном картографировании неоправданно генерализовались.

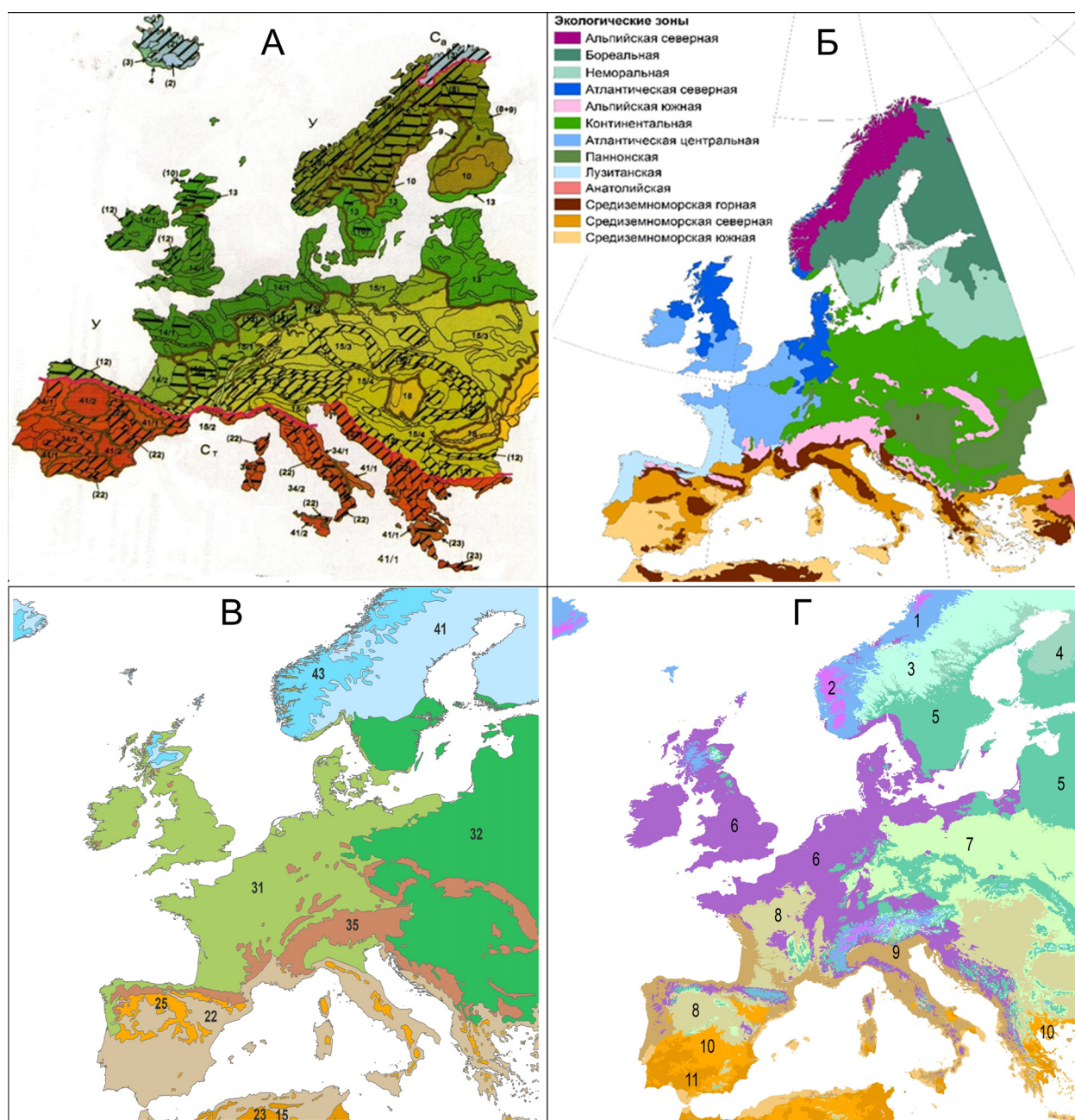


Рис. 3. Зонально-климатическая дифференциация Европы: А – географические пояса и природные зоны по [Романова, 2004]; Б – экологические зоны по [Metzger et al., 2005]; В – экологические зоны ФАО (2001): субтропические: 22 – сухие леса; 23 – степи; 24 – пустыни; 25 – горные экосистемы; умеренные: 31 – океанические леса; 32 – континентальные леса; 33 – степи; бореальные: 41 – хвойные леса; 43 – горные системы; Г – новая модель зональных группировок природных комплексов: бореальные: 1 – горные тундры; 2 – избыточно-влажные горные мелколиственные леса; 3 – умеренно-влажные среднетаежные леса; 4 – умеренно-влажные южнотаежные леса; 5 – умеренно-влажные южнотаежные и смешанные леса; суббореальные: 6 – влажные (приатлантические) широколиственные леса; 7 – умеренно-влажные широколиственные леса; 8 – умеренно-влажные термофильные широколиственные леса и лесостепи; субтропические и переходные к ним: 9 – смешанные и жестколистные леса; 10 – термофильные жестколистные леса; 11 – термофильные жестколистные редколесья

Fig. 3. Zonal-climatic differentiation of Europe: A (top left) – geographical zones and natural zones according to [Romanova, 2004]; Б – ecological zones according to [Metzger et al., 2005]; В – ecological zones of FAO (2001): subtropical: 22 – dry forests; 23 – steppes; 24 – deserts; 25 – mountain ecosystems; temperate: 31 – oceanic forests; 32 – continental forests; 33 – steppes; boreal: 41 – coniferous forests; 43 – mountain systems; Г – new model of zonal groupings of natural complexes: boreal: 1 – mountain tundra; 2 – excessively moist mountain small-leaved forests; 3 – moderately humid middle taiga forests; 4 – moderately humid southern taiga forests; 5 – moderately humid southern taiga and mixed forests; subboreal: 6 – humid (Atlantic) broad-leaved forests; 7 – moderately humid broadleaved forests; 8 – moderately humid thermophilic deciduous forests and forest-steppe; subtropical and transitional to them: 9 – mixed and sclerophyllous forests; 10 – thermophilic sclerophyllous forests; 11 – thermophilic sclerophyllous woodlands

Использование геоинформационных методов для мелкомасштабного картографирования показало, что основное ограничение связано со сложностью выбора оптимального числа классов для получения адекватной картины пространственной дифференциации природных комплексов. Очевидно, что выбор большего числа конечных классов при моделировании и меньшего диапазона значений между входными переменными обеспечивает получение на выходе анализа более крупномасштабных географических мозаик. Однако, в реальности получающиеся классы объектов сложны для интерпретации в качестве природных зон, кроме того, они имеют более низкий таксономический ранг. В то же время вопрос о том, что это за единицы, остается дискуссионным, поскольку в парадигме моделирования размерность получаемых матриц достаточно условна. Полученные более детальные комбинации однородных эоклиматических условий окружающей среды могут быть использованы для решения иных задач, в том числе при изучении местообитаний и биоразнообразия, для оценки экосистемных услуг, разработки сети экологического мониторинга и др.

ВЫВОДЫ

При реализации автоматических алгоритмов, примененных в данной работе, становится понятно, что использование только климатических переменных (пусть и в разнообразных комбинациях) для моделирования зональных группировок природных комплексов недостаточно. Иными словами, хотя природная зона и представляет собой во многом климатически обусловленный феномен, получить только на основании параметризации климатиче-

ских переменных глобальную картографическую модель зональной дифференциации (как при экспортном картографировании) вряд ли возможно. Одним из возможных путей разрешения этого противоречия может быть добавление в процедуру кластерного анализа переменных, характеризующих свойства ландшафтного покрова (land cover).

Использование наборов глобальных климатических данных для ГИС-моделирования зональных рубежей позволяет переосмыслить и дополнить классификацию природных зон, развиваемую в отечественной физической географии. Вовлечение в анализ на глобальном уровне большего, чем при мануальном картографировании, числа переменных дает не просто качественно иные результаты при выделении зональных группировок, но и позволяет выявить вклад различных климатических факторов в дифференциацию природных комплексов в разных географических поясах.

Результаты параметризации климатических данных (в частности, полученные зонально-климатические границы) в значительной степени соотносятся с имеющимися схемами поясно-секторно-зональной структуры материков и могут служить для разработки типологии ландшафтов на основе геопространственного моделирования. При этом локализация модели (ограничение пространства моделирования одним материком или частью света) означает уменьшение диапазона разброса значений характеристик, используемых для анализа. Чем более локализована модель, тем большей точности можно достигать в отношении очертаний границ природных зон, а также в выделении «подзон» и экотонных зон с более резкими климатическими градиентами.

Благодарность. Исследование выполнено в рамках темы Госзадания «Анализ региональных геоэкологических проблем в условиях глобальных изменений окружающей среды» кафедры физической географии мира и геоэкологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Географические пояса и зональные типы ландшафтов мира / карта под ред. Е.Н. Лукашовой; м-б 1:15 000 000. М.: ГУГК, 1988.
- Григорьев А.А., Будыко М.И. О периодическом законе географической зональности // Доклады АН СССР. 1956. Т. 110. № 1. С. 129–132.
- Докучаев В.В. К учению о зонах природы. Горизонтальные и вертикальные почвенные зоны. СПб., 1899. 27 с.
- Дьяконов К.Н., Шиловцев О.А., Харитонов Т.И. Пространственные закономерности использования солнечной радиации (ФАР) ландшафтами Восточной Европы // Известия РАН. Серия географическая. 2005. № 1. С. 24–32.
- Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.
- Исаченко А.Г. Ландшафтная структура Земли, расселение, природопользование. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2008. 320 с.
- Исаченко А.Г., Шляпников А.А. Ландшафты. М.: Мысль, 1989. 504 с.
- Лукашова Е.Н., Игнатьев Г.М. Ландшафты суши и физико-географическое районирование материков. Пояснительный текст. Физико-географический атлас мира. М., 1964. 293 с.

- Мильков Ф.Н. К вопросу о существовании ландшафтной сферы Земли и о месте ландшафтоведения в системе физико-географических наук // Науч. докл. Высшей школы. Геол.-геогр. науки. 1959. № 1. С. 15–20.
- Романова Э.П. Ландшафтная структура суши Земли. География, общество, окружающая среда. Т. II: Функционирование и современное состояние ландшафтов. М.: Городец, 2004. С. 303–318.
- Романова Э.П., Алексеева Н.Н., Аршинова М.А., Климанова О.А., Ковалева Т.А., Кондратьева Т.И., Медведев А.А. Новая карта мира «Географические пояса и природные зоны суши Земли» // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 4. С. 3–11.
- Рябчиков А.М. Структура и динамика геосферы. Ее естественное развитие и изменение человеком. М.: Мысль, 1972. 224 с.
- Bailey R.G. *Ecoregions: the Ecosystem Geography of the Oceans and Continents*, New York, Springer, 1998, 176 p.
- Bailey R.G. *Ecosystem Geography. From Ecoregions to Sites*, New York, Springer-Verlag, 2009, 251 p.
- Bunce R.G.H., Carey P.D., Elena-Rosselló R., Orr J., Watkins J.W., Fuller R. A comparison of different biogeographical classifications of Europe, Great Britain and Spain, *Journal of Environmental Management*, 2002, no. 65, p. 121–134.
- Clement F.E., Shelford V.E. *Bio-ecology*, New York, John Wiley & Sons, 1939, 425 p.
- Eetvelde van V., Antrop M. A stepwise multi-scaled landscape typology and characterization for trans-regional integration, applied on the federal state of Belgium, *Landscape and Urban Planning*, 2009, no. 91, p. 160–170.
- Ergüner Y., Kumar J., Hoffman F.M., Dalfes H.N., Hargrove W.W. Mapping ecoregions under climate change: a case study from the biological ‘crossroads’ of three continents, Turkey, *Landscape Ecology*, 2019, no. 34, p. 35–50.
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, 2017, no. 37(12), p. 4302–4315.
- Global Ecological Zoning for the Global Forest Resources Assessment 2000*, Final Report, Rome, FAO, 2001, 211 p.
- Hargrove W., Hoffman F. Potential of Multivariate Quantitative Methods for Delineation and Visualization of Ecoregions, *US Department of Energy Publications*, 2005, no. 10, p. 41–59.
- Isachenko A.G. Seasonal hydrothermic phases of landscapes, *Resources and Environment: World Atlas*, Ed. Holzel, Vienna and IG RAS, Moscow, 1998, vol. 2, plate 133.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, vol. 15, no. 3, p. 259–263.
- Lowell K.E. Differences between ecological land type maps produced using GIS or manual cartographic methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, no. 56, p. 169–173.
- Metzger M.J., Bunce R.G.H., Jongman R.H.G., Muche C.A., Watkins J.W. A climatic stratification of the environment of Europe, *Global Ecology and Biogeography*, 2005, no. 14(6), p. 549–563.
- Metzger M.J., Bunce R.G.H., Jongman R.H.G., Sayre R., Trabucco A., Zomer R. A high-resolution bioclimate map of the world: a unifying framework for global biodiversity research and monitoring, *Global Ecology and Biogeography*, 2013, no. 22, p. 630–638.
- Mucher C.A., Klijn J.A., Wascher D.M., Schamine'e J.H.J. A new European Landscape Classification (LANMAP): A transparent, flexible and user-oriented methodology to distinguish landscapes, *Ecological Indicators*, 2010, no. 10, p. 87–103.
- Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V.N., Underwood E.C., D'Amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth, *Bioscience*, 2001, no. 51(11), p. 933–938.
- Sayre R., Bow J., Josse C., Sotomayor L., Touval J. Terrestrial Ecosystems of South America, *North America Land Cover Summit*, 2008, p. 131–152.
- Sayre R., Dangermond J., Frye C., Vaughan R., Aniello P., Breyer S.P., Cribbs D., Hopkins D., Nauman R., Derrenbacher W., Wright D.J., Brown C., Convis C., Smith J.H., Benson L., VanSistine D.P., Warner J., Cress J.J., Danielson S.L., Hamann T., Cecere A.D., Reddy D., Burton A., Grosse D., True H., Metzger M., Hartmann J., Moosdorf N., Durr H., Paganini M., Defourny P., Arino O., Maynard S., Anderson M., Comer P. A New Map of Global Ecological Land Units – An Ecophysiographic Stratification Approach, Washington, DC, Association of American Geographers, 2014, 46 p.
- Walter H. Die Vegetation der Erde in ökologischer Betrachtung, bd. 2, *Gemäßigten und arktischen Zonen*, Jena, G. Fischer, 1968, 1001 p.
- Walter H., Breckle S.W. *Walter's Vegetation of the Earth: The Ecological Systems of the Geo-Biosphere*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002, 527 p.

Поступила в редакцию 20.05.2021

После доработки 16.11.2021

Принята к публикации 27.12.2021

PROBLEMS OF GEOINFORMATION MODELING OF NATURAL-ZONAL DIFFERENTIATION IN GEOGRAPHY

E.Yu. Kolbowski¹, N.N. Alekseeva², A.I. Bancheva³, O.A. Klimanova⁴

¹⁻⁴ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of World Physical Geography and Geoecology*

¹ *Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: kolbowski@mail.ru*

² *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: nalex01@mail.ru*

³ *Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ban-sai@mail.ru*

⁴ *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: oxkl@yandex.ru*

The natural zone is a basic concept of physical geography, reflecting the horizontal differentiation of the geographic sphere from the equator to the poles. Diversification of global geospatial data and the improvement of automatic computer classification methods offer new opportunities for the application of geoinformation analysis algorithms for delimitation of land units by zonal climatic features. The aim of the article is to apply geoinformation modeling to identify natural zonal boundaries, as well as to reveal limitations and problems associated with the uncontrolled classification. We use normalized indicators from the University of Edinburgh database (compiled on the basis of WorldClim data). At the first step, a set of significant climatic parameters necessary to model zonal-climatic groupings of natural complexes: annual temperature range, seasonality of monthly average temperatures, annual sum of average daily temperatures above 0°C, annual seasonality of precipitation, Thornthwaite aridity index and seasonality of potential evapotranspiration, was substantiated by the analysis of the main components. Further, uncontrolled classification of these parameters was carried out according to a different number of classes (15, 22, 72). To obtain a picture similar to the global natural-zonal differentiation, 22 classes are allocated in the model. New zonal-climatic boundaries obtained as a result of modeling were compared with the boundaries of natural zones on maps compiled on the basis of other methodological approaches using the case of Europe. In general new boundaries reflect major regularities of the belt-zonal differentiation of the land and could provide background for further typology of landscapes by means of geoinformation modeling. The study made it possible to identify principal methodological limitations of the geoinformation modeling of natural zones at the global and continental levels. Limitations of the cluster analysis for small-scale mapping of natural complexes are also associated with the complexity of choosing the optimal number of classes to obtain adequate visualization of the spatial structure of natural zonal systems, as well as with the “equal contribution” factor of all climatic variables used for modeling. It is shown that realization of automated modeling algorithms requires other geospatial data, in addition to climatic parameters (even in various combinations). The undoubted advantage of the described approach is the reproducibility of classification algorithms and the possibility to obtain the required degree of detail at the output, depending on specific tasks of particular geo-ecological studies.

Keywords: natural zoning, zonal-climatic boundaries, climatic data, GIS-modeling

Acknowledgements. The study was carried out under the State assignment topic “Analysis of regional geo-ecological problems under global environmental change” of the Department of the World Physical Geography and Geoecology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University and the Program of Development of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The future of the planet and global environmental change”.

REFERENCES

- Bailey R.G. *Ecoregions: the Ecosystem Geography of the Oceans and Continents*, New York, Springer, 1998, 176 p.
- Bailey R.G. *Ecosystem Geography. From Ecoregions to Sites*, New York, Springer-Verlag, 2009, 251 p.
- Bunce R.G.H., Carey P.D., Elena-Rosselló R., Orr J., Watkins J.W., Fuller R. A comparison of different biogeographical classifications of Europe, Great Britain and Spain, *Journal of Environmental Management*, 2002, 65, p. 121–134.
- Clement F.E., Shelford V.E. *Bio-ecology*, New York, John Wiley & Sons, 1939, 425 p.
- D'jakonov K.N., Shilovcev O.A., Haritonova T.I. Prostranstvennyye zakonomernosti ispol'zovaniya solnechnoy radiatsii (FAR) landshaftami Vostochnoy Evropy [Spatial peculiarities of solar radiation use (FAR) by the landscapes of Eastern Europe], *Izvestiya RAN, ser. Geograficheskaya*, 2005, no. 1, p. 24–32. (In Russian)
- Dokuchaev V.V. *Kucheniye o zonakh prirody. Gorizontal'nye i vertikal'nye pochvennye zony* [On the Theory of Natural Zones: Lateral and Vertical Soil Zones], St. Petersburg, 1899, 27 p. (In Russian)
- Eetvelde van V., Antrop M. A stepwise multi-scaled landscape typology and characterization for trans-regional integration, applied on the federal state of Belgium, *Landscape and Urban Planning*, 2009, no. 91, p. 160–170.
- Ergüner Y., Kumar J., Hoffman F.M., Dalfes H.N., Hargrove W.W. Mapping ecoregions under climate change: a case study from the biological ‘crossroads’ of three continents, Turkey, *Landscape Ecology*, 2019, no. 34, p. 35–50.

- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *Int. Journal of Climatology*, 2017, no. 37(12), p. 4302–4315.
- Geograficheskie pojasa i zonal'nye tipy landshaftov [Geographical belts and zonal types of landscapes], E.N. Lukashova (ed.), map, scale 1 : 15 000 000, Moscow, GUGK Publ., 1988. (In Russian)
- Global Ecological Zoning for the Global Forest Resources Assessment 2000, Final Report, Rome, FAO, 2001, 211 p.
- Grigor'ev A.A., Budyko M.I. O periodicheskom zakone geograficheskoi zonal'nosti [About the periodic law of geographical zoning], *Doklady AN SSSR*, 1956, vol. 110, no. 1, p. 129–132. (In Russian)
- Hargrove W., Hoffman F. Potential of Multivariate Quantitative Methods for Delineation and Visualization of Ecoregions, *US Department of Energy Publications*, 2005, no. 10, p. 41–59.
- Isachenko A.G. Landshaftnaja struktura Zemli, rasselenie, prirodopol'zovanie [Landscape pattern of the Earth, resettlement, and nature management], St. Petersburg, Izdvo S.-Peterb. un-ta, 2008, 320 p. (In Russian)
- Isachenko A.G. Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe rajonirovanie [Landscape science and physical-geographical regionalization], Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1991, 366 p. (In Russian)
- Isachenko A.G., Shljapnikov A.A. Landshafty [Landscapes], Moscow, Mysl' Publ., 1989, 504 p. (In Russian)
- Isachenko A.G. Seasonal hydrothermic phases of landscapes, *Resources and Environment: World Atlas*, Ed. Holzel, Vienna and IG RAS, Moscow, 1998, vol. 2, 133 p.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, vol. 15, no. 3, p. 259–263.
- Lowell K.E. Differences between ecological land type maps produced using GIS or manual cartographic methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, no. 56, p. 169–173.
- Lukashova E.N., Ignat'ev G.M. [Terrestrial landscapes and physical geographical regionalization of the continents. Explanatory notes], *Fiziko-geograficheskii atlas mira* [Physical-Geographical Atlas of the World], Moscow, 1964, 293 p. (In Russian)
- Metzger M.J., Bunce R.G.H., Jongman R.H.G., Muche C.A., Watkins J.W. A climatic stratification of the environment of Europe, *Global Ecology and Biogeography*, 2005, no. 14(6), p. 549–563.
- Metzger M.J., Bunce R.G.H., Jongman R.H.G., Sayre R., Trabucco A., Zomer R. A high-resolution bioclimate map of the world: a unifying framework for global biodiversity research and monitoring, *Global Ecology and Biogeography*, 2013, no. 22, p. 630–638.
- Mil'kov F.N. K voprosu o sushhestvovanii landshaftnoj sfery Zemli i o meste landshaftovedenija v sisteme fiziko-geograficheskikh nauk [To the existence of the Earth's landscape sphere and the place of landscape science within the system of physical-geographical sciences], *Nauchn. dokl. Vysshej shkoly. Geol.-geogr. nauki*, 1959, no. 1, p. 15–20. (In Russian)
- Mucher C.A., Klijn J.A., Wascher D.M., Schamine'e J.H.J. A new European Landscape Classification (LANMAP): A transparent, flexible and user-oriented methodology to distinguish landscapes, *Ecological Indicators*, 2010, no. 10, p. 87–103.
- Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V.N., Underwood E.C., D'Amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth, *Bioscience*, 2001, no. 51(11), p. 933–938.
- Rjabchikov A.M. Struktura i dinamika geosfery. Ejo estestvennoe razvitie i izmenenie chelovekom [Structure and dynamics of the geosphere. Its natural evolution and man-made changes], Moscow, Mysl' Publ., 1972, 224 p. (In Russian)
- Romanova E.P. [Landscape structure of terrestrial areas of the Earth], *Geografiya, obshchestvo, okruzhayushchaya sreda, t. II, Funktsionirovanie i sovremennoe sostoyanie landshaftov* [Geography, Society, Environment, vol. II, Functioning and current state of landscapes], Moscow, Gorodets Publ., 2004, p. 303–318. (In Russian)
- Romanova E.P., Alekseeva N.N., Arshinova M.A., Klimanova O.A., Kovaleva T.A., Kondratyeva T.I., Medvedev A.A. Novaya karta mira "Geograficheskie poyasa i prirodnye zony sush' Zemli" [A new map of "Geographical belts and natural zones of the Earth"], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 4, p. 3–11. (In Russian)
- Sayre R., Bow J., Josse C., Sotomayor L., Touval J. Terrestrial Ecosystems of South America, *North America Land Cover Summit*, 2008, p. 131–152.
- Sayre R., Dangermond J., Frye C., Vaughan R., Aniello P., Breyer S.P., Cribbs D., Hopkins D., Nauman R., Derrenbacher W., Wright D.J., Brown C., Convis C., Smith J.H., Benson L., VanSistine D.P., Warner J., Cress J.J., Danielson S.L., Hamann T., Cecere A.D., Reddy D., Burton A., Grosse D., True H., Metzger M., Hartmann J., Moosdorf N., Durr H., Paganini M., Defourny P., Arino O., Maynard S., Anderson M., Comer P. *A New Map of Global Ecological Land Units. An Ecophysiological Stratification Approach*, Washington, DC, Association of American Geographers, 2014, 46 p.
- Walter H., Breckle S.W. *Walter's Vegetation of the Earth: The Ecological Systems of the Geo-Biosphere*, New York, Springer-Verlag, 2002, p. 86.
- Walter H. Die Vegetation der Erde in ökologischer Betrachtung, bd. 2, *Gemässigten und arktischen Zonen*, Jena, G. Fischer, 1968, 1001 p.

Received 20.05.2021

Revised 16.11.2021

Accepted 27.12.2021