

## ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4

### КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РАЗНООБРАЗИЯ ПОЧВ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ РОССИИ (ПО КАРТОГРАФИЧЕСКИМ ДАННЫМ)

© 2019 г. М. А. Смирнова<sup>1</sup>, \*, А. Н. Геннадиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

\*e-mail: summerija@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.06.2018 г.

После доработки 17.07.2018 г.

Принята к публикации 29.08.2018 г.

Проведена количественная оценка разнообразия компонентов почвенного покрова Арктики и Субарктики, отраженного на Почвенной карте России М 1 : 2 500 000 в границах почвенных равнинных и горных округов по Карте почвенно-экологического районирования того же масштаба. Для каждого почвенного округа (всего 60) рассчитаны средние, минимальные и максимальные размеры почвенных ареалов, индексы богатства (количество ареалов и классификационных выделов), видового богатства (Маргалёфа, Менхиника), доминирования (Бергера-Паркера, Макинтоша, Симпсона), сложности почвенного покрова (индекс дробности, коэффициент сложности), разнообразия (Шеннона, нормированный индекс Шеннона, Джини-Симпсона), латеральной дифференциации и проведена суммарная оценка разнообразия, учитывающая данные по всем рассчитанным индексам. При расчете индексов использованы следующие количественные характеристики почвенного покрова: число почвенных ареалов, классификационных выделов, длины границ, площади ареалов (в том числе средние и максимальные значения) и их соотношение. Показано, что уровень почвенного разнообразия увеличивается при переходе от зоны арктических почв к подзоне арктотундровых почв субарктики и сопровождается увеличением размеров почвенных ареалов. Печорско-Карский, Мезенско-Чешский и Нижнеенисейский равнинные округа, Корякский, Анадырский и Пекульнейско-Искатеньский горные округа характеризуются максимальным почвенным разнообразием, Южно-новоземельские горные и равнинные округа – минимальным.

*Ключевые слова:* структура почвенного покрова, арктические почвы (Haplic Cryosols), арктотундровые почвы (Haplic Cryosols), тундрово-глеевые почвы (Histic Cryosols), педоразнообразие

DOI: 10.1134/S0032180X19010143

#### ВВЕДЕНИЕ

Арктические и субарктические регионы занимают обширные территории в пределах Российской Федерации, на их долю приходится более 8% от всей сухопутной площади страны. Традиционно считается, что разнообразие почв Арктики и Субарктики невелико в силу специфических физико-географических условий: суженного спектра компонентов растительного покрова; нивелирующего влияния широко распространенных плотных и многолетнемерзлых пород; суровости климатических условий, ограничивающих варианты развития почвенного профиля и соответственно дифференциацию почвенного покрова; относительной молодости поверхности [2, 5, 7]. Существующие немногочисленные количественные оценки почвенного разнообразия Мира и России в общем подтверждают данное положение: Арктика и Субарктика характеризуются наименьшими значениями индексов разнообразия по сравнению с другими регионами [1, 8, 18, 20].

Вместе с тем актуальность оценок почвенного разнообразия арктических и субарктических территорий возрастает в связи с их повышенной экологической уязвимостью, с необходимостью более четкого территориально-дифференцированного подхода к организации мониторинга состояния природной среды и к разработке программ сохранения и рекультивации почвенного покрова, особенно в условиях потепления климата и увеличения нагрузки на экосистемы Севера [13, 14, 23].

Следует отметить, что в указанных выше работах показатели почвенного разнообразия даны для крупных территориальных выделов в пределах Арктики и Субарктики – в границах континентов, почвенных подзон и провинций. Для более низкого уровня территориальных единиц и в более детальном масштабе результаты оценки почвенного разнообразия Арктики и Субарктики не приведены.

В этой связи целью настоящего исследования стала оценка разнообразия почвенного покрова

Российской Арктики и Субарктики, отраженного на Почвенной карте России М 1 : 250000 [9] в границах 38 равнинных и 22 горных округов [6].

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

На карте почвенно-экологического районирования [6] Арктика и Субарктика России представлена зоной арктических почв Арктики, подзоной арктотундровых почв Субарктики и подзоной тундровых глеевых почв и подбуров Субарктики. Отметим, что границы, проведенные на карте почвенно-экологического районирования [6], не совпадают с ландшафтными: граница между зоной арктических почв и подзоной арктотундровых почв проведена по северной части арктической тундры, подзональные границы проведены по южной части типичной тундры.

В пределах равнинных участков на более низком таксономическом уровне выделено 14 провинций, 38 округов и 161 район, в пределах горных участков – 6 почвенных провинций и 22 округа, районы не выделены. Таким образом, наименьшей территориальной единицей почвенно-экологического районирования для территории Арктики и Субарктики России, выделенной как в пределах равнинных, так и горных территорий, являются почвенные округа, почвенный покров которых и был выбран в качестве объекта (рис. 1). Картографические материалы и базы данных были получены с сайта Единого государственного реестра почвенных ресурсов России [4]. Для каждого округа были рассчитаны следующие показатели почвенного разнообразия: индексы богатства (количество почвенных ареалов, количество классификационных выделов), видового богатства (Маргалефа, Менхиника), доминирования (Бергера-Паркера, Макинтоша, Симпсона), сложности почвенного покрова (коэффициент сложности, индекс дробности), разнообразия (Шеннона, нормированный индекс Шеннона, Джини-Симпсона), латеральной дифференциации. Формулы для расчета индексов представлены в табл. 1.

Для проведения суммарной оценки почвенного разнообразия было сделано допущение, что каждый из приведенных выше показателей почвенного разнообразия имеет равный вес. Алгоритм проведения оценки был следующий: в выборках, соответствующих каждому показателю почвенного разнообразия, было выполнено ранжирование значений от наибольшего к наименьшему. Затем, с шагом в единицу каждому значению присваивался балл – от 1 для самого минимального до 60 для самого максимального (это касалось всех индексов за исключением индексов доминирования; для последних было принято, что, чем больше значение индекса, тем меньше балл). Полученные баллы суммировались для каждого почвенного равнинного или горного округа и

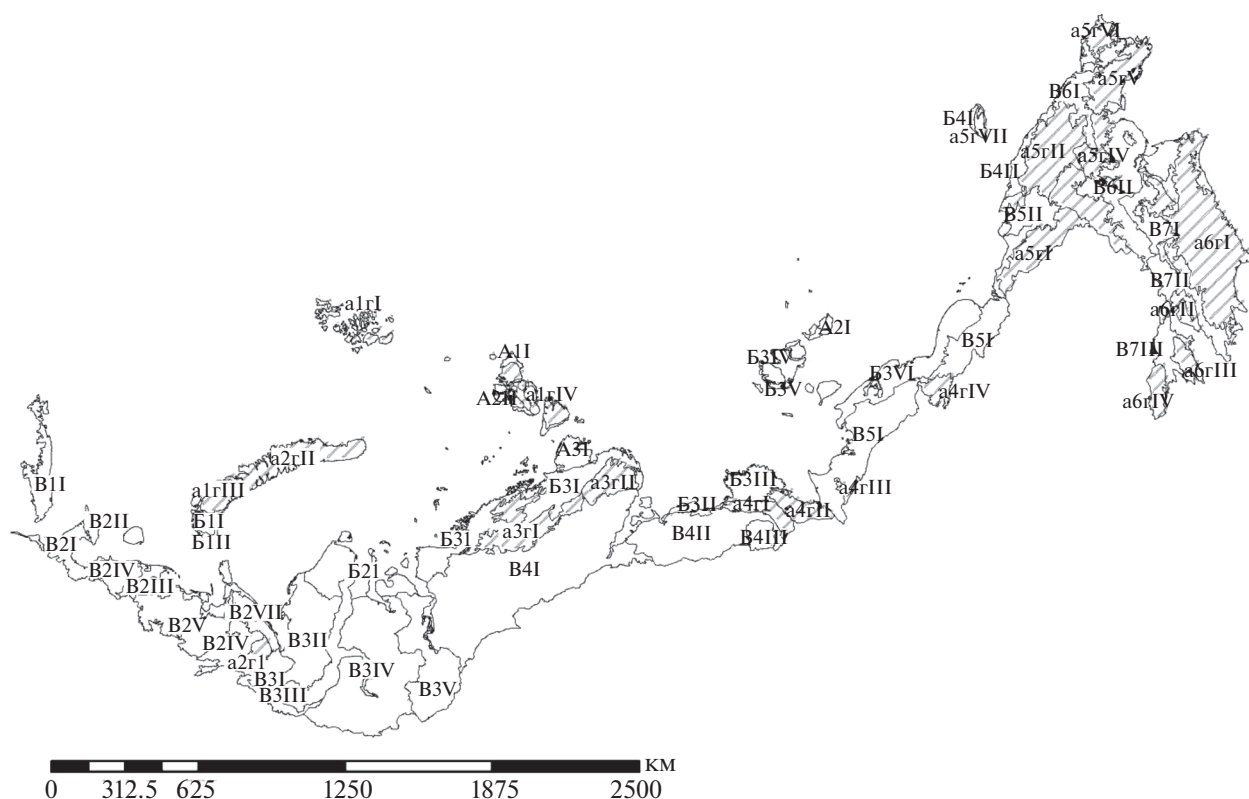
характеризовали суммарную бальную оценку почвенного разнообразия.

В соответствии со значениями индексов в программе ArcGIS были построены карты. Группировка значений индексов в классы проводилась методом равных интервалов. В программе Statistica были рассчитаны значения коэффициентов корреляции между показателями почвенного разнообразия с уровнем значимости 0.01, проверены данные о распределении значений индексов на нормальность, построены аппроксимирующие графики зависимости количества классификационных выделов почв от площади ареалов и рассчитана величина достоверности аппроксимации. Отдельно был проведен анализ гистограмм ранг/обилие в пределах горных и равнинных территорий (в качестве обилия использовалось количество почвенных ареалов каждого классификационного выдела; площадь, занимаемая каждым классификационным выделом на карте). Кроме того, были рассчитаны средние значения ареалов почв в пределах округов, получены значения максимальной и минимальной площади ареала в пределах округа.

Подчеркнем, что проведенная нами оценка разнообразия компонентов почвенного покрова является до некоторой степени приблизительной в силу используемого картографического материала: на почвенной карте [9] отражены территории с разной степенью изученности почвенного покрова и в таксономических единицах разного классификационного уровня, что придает некоторый уровень условности интерпретации полученных результатов. Кроме того, используемые в работе индексы, заимствованные как из теории структур почвенного покрова [12], так и из соответствующих работ по оценке педо- [19] и биоразнообразия [22], не позволяют учесть сложность почвенного покрова исследуемой территории в полной мере. Большая часть полигонов, выделенных на почвенной карте [9], содержит в себе название сразу нескольких почв (например, тундровые глеевые торфянисто-перегнойные, тундровые глеевые торфянистые и торфяные; пойменные заболоченные и почвы мерзлотных трещин) без указания соотношения площадей, протяженности границ между ними, частоты встречаемости компонентов в пределах ареалов и т. д., что не позволяет учитывать данную информацию при расчетах индексов. Таким образом, при расчетах индексов сопутствующие почвы не учитывались.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Гистограммы ранг/обилие.** Гистограмма распределения суммарной площади, занимаемой каждым классификационным выделом (рис. 2), подчиняется закону Уилсона, согласно которому всегда имеет место доминирование небольшого количества объектов и редкая встречаемость всех



**Рис. 1.** Почвенные округа: А1I – округ островов Пионер и Комсомолец, А2I – округ побережий островов Октябрьской революции, Большевик, Анжу, А2II – округ острова Октябрьской революции, А3I – Челюскинский, Б1I – Южно-Новоземельский, Б1II – Вайгачско-Южно-Новоземельский, Б2I – Северо-Ямало-Гыданский, Б3I – Нижне-Таймырский, Б3II – Приморско-Лаптевский, Б3III – Усть-Ленский, Б3IV – округ Новосибирских островов, Б3V – округ островов Котельный и Белковский, Б3VI – Приморско-Якутский, Б4I – Врангелевский, Б4II – Приморско-Чукотский, В1I – Мурманский, В2I – Мезенско-Чешский, В2II – Тиманско-Канинский, В2III – Печорско-Карский, В2IV – Малоземельский, В2V – Большеземельский, В2VI – Воркутинский, В2VII – Пай-Хойский, В3I – Карско-Байдарацкий, В3II – Ямальский, В3III – Усть-Обский, В3IV – Тазовско-Гыданский, В3V – Нижнеенисейский, В4I – Пясино-Хатангский, В4II – Оленек-Анабарский, В4III – Кытыкский, В5I – Яно-Индигирско-Колымский, В5II – Чаунский, В6I – Ванкаремский, В6II – Анадырский, В7I – Майнско-Красноозерский, В7II – Пенжинский, В7III – Гижигинский, а1rI – округ Земли Франца Иосифа, а1rII – Северо-Новоземельский, а1rIII – Южно-Новоземельский, а1rI – Северо-Земельский, а2rI – Шучье-Ханмейский, а3rI – Западно-Быррангский, а3rII – Восточно-Быррангский, а4rI – Чекановский, а4rII – Хараулахский, а4rIII – Улахан-Сисский, а4rIV – Кондаковский, а5rI – Раучуанский, аrII – Паляваамский, а5rIII – Анадырский, а5rIV – Пекульнейско-Искатеньский, а5rV – Южно-Чукотский, а5rVI – Тенканыйский, а5rVII – Врангелевский, а6rI – Корякский, а6rII – Пенжинский, а6rIII – Тайгоносский, а6rIV – Нахаянский.

остальных объектов. Отметим, что большинство биологических объектов, а также почв различных регионов мира вне зависимости от используемых классификационных систем подчиняются данному закону [16, 17].

Наиболее часто встречающимися почвами в пределах равнин Арктики и Субарктики России являются тундровые глеевые торфянистые и торфяные (Reductaquic Haplic Cryosols), торфянисто и торфяно-глеевые болотные почвы (Fibric Dystric Histosols), и почвы пятен. В то же время максимальные по размерам площади приходятся на арктотундровые и тундровые слабооглеенные гумусные, почвы пятен и мерзлотных трещин. В пределах горных территорий горные примитивные почвы и тундровые подбуры (Podzols Gelic)

являются как наиболее часто встречающимися, так и занимающими наибольшие площади.

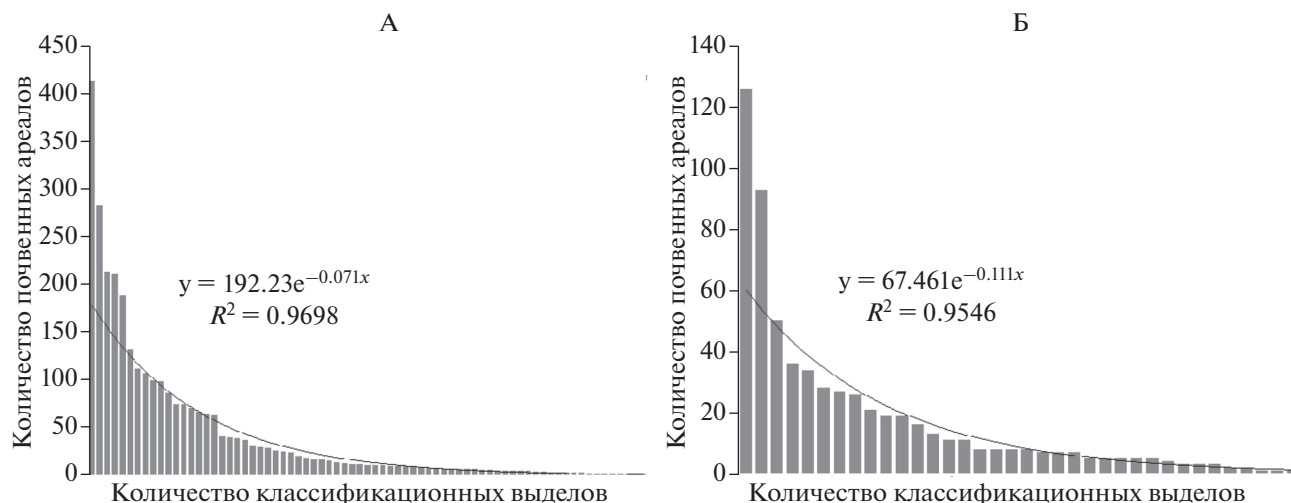
#### **Кривая зависимости количества ареалов почв, классификационных выделов от площади округа.**

Площадь почвенного округа и количество выделенных в нем почвенных ареалов, классификационных выделов являются статистически связанными с уровнем значимости 0.01. Для равнинных округов характерно более резкое увеличение количества классификационных выделов почв при увеличении размеров округа в сравнении с горными территориями. По-видимому, это обусловлено значительно большим количеством различных классификационных выделов, встречаемых на равнинах (практически в два раза в сравнении с горными территориями), а значит и большим

Таблица 1. Индексы разнообразия (по [8, 11, 12, 22])

Показатели почвенного разнообразия	Формула расчета*	Примечания
Индексы богатства		
$n$	$n$	Характеризует количество классификационных выделов, определяющих классификационное разнообразие
$N$	$N$	Характеризует общее число ареалов всех классификационных выделов
Индексы видового богатства		
Маргалефа	$D_{Mg} = \frac{n-1}{\ln N}$	Учитывают количество классификационных выделов и общее число ареалов всех классификационных выделов
Менхиника	$D_{Mn} = \frac{S}{\sqrt{N}}$	
Индексы доминирования		
Бергера-Паркера	$d = \frac{N_{max}}{N}$	Учитывают количество классификационных выделов и общее число ареалов всех групп почв
Макинтоша	$D = \frac{N - \sqrt{\sum_{i=1}^n n_i^2}}{N - \sqrt{N}}$	
Симпсона	$D = \frac{\sum_{i=1}^n (n_i(n_i - 1))}{N(N - 1)}$	
Индексы сложности почвенного покрова		
Индекс дробности	$ИД = \frac{N}{\sum_{i=1}^k S_i}$	Характеризуют пространственный рисунок почвенного покрова
Коэффициент сложности	$КС = \frac{\overline{KP}(S - S_{max})}{\bar{S} \cdot S}$	
	где $\overline{KP} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{3.54 \sqrt{S_i}}$ $N$	
Индексы разнообразия и латеральной дифференциации		
Шеннона	$SHDI = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$	Характеризуют пространственный рисунок почвенного покрова и количество классификационных выделов
Нормированный Шеннона	$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i}{\ln n}$	
Джини-Симпсона	$G = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2$	
Латеральной дифференциации	$ild = \frac{n}{M}$	

\* $n$  – количество классификационных выделов почв на исследуемой территории;  $N$  – общее число ареалов всех групп почв  $n$  на исследуемой территории;  $N_{max}$  – число ареалов почв самой обильной группы;  $S_i$  – площадь контуров;  $\bar{S}$  – средняя площадь ареала на участке,  $S_{max}$  – площадь наиболее крупного ареала на участке;  $\overline{KP}$  – среднее значение коэффициента расчленения,  $P_i$  – длина границы (периметр) ЭПА;  $S_i$  – площадь ЭПА;  $p_i$  – часть исследуемого участка, занятая почвенной группой  $i$  и выраженная в долях от единицы;  $M$  – доля площади, занимаемая преобладающим классификационным выделом в полигоне.



**Рис. 2.** Степень относительной встречаемости классификационных выделов; А – равнинные территории Арктики и Субарктики; Б – горные территории Арктики и Субарктики.

количеством вариантов, которыми могут быть представлены почвенные ареалы.

Интерпретация графиков отношения между количеством почвенных ареалов, классификационных выделов и размерами исследуемой территории, а также подбор аппроксимирующих моделей, наиболее полно описывающих характер этих отношений, является относительно новым направлением в географии почв [19]. В экологических и биогеографических исследованиях аналогичные графики, как правило, описываются одной из четырех моделей: геометрической, логарифмической, логнормальной или сломанного стержня Мак-Артура [10, 16]. На примере почвенного покрова островов Эгейского моря [17], центрального Ирана [24], центральной части штата Арканзас [21] показано, что экспоненциальная модель, в сравнении с другими, лучше всего аппроксимируют графики зависимости количества почвенных ареалов или классификационных выделов от размеров участков. При этом, значения коэффициента достоверности уровня аппроксимации могут быть ниже 0.9, что говорит о сложном характере изменения количества классификационных выделов и почвенных ареалов при изменении размера исследуемого участка. Почвенный покров Арктики и Субарктики не является исключением из приведенных в литературных источниках примеров: экспоненциальная кривая также наилучшим образом аппроксимирует отношение количества классификационных выделов, почвенных ареалов от размера исследованных участков. Коэффициент достоверности аппроксимации составляет 0.64.

**Размеры почвенных ареалов.** Для гор характерны меньшие размеры почвенных ареалов, чем для равнинных участков. При этом периметры ареа-

лов в горных округах больше, чем в равнинных. Данная особенность обусловлена большей изрезанностью границ почвенных ареалов в горах, чем на равнинах. Минимальные размеры почвенных ареалов в пределах равнин и гор сопоставимы, что вероятно, определяется картографическими особенностями отображения почвенных ареалов при данном масштабе карты.

При переходе из зоны арктических почв в подзону арктотундровых почв Субарктики происходит увеличение площадей и периметров почвенных ареалов (как среднего значения, так и минимального, максимального); контуры ареалов почв в пределах Субарктики (подзоны арктотундровых почв и подзоны тундровых глеевых почв и подбуров) сопоставимы по своим размерам. Представляется, что данная особенность связана с резким изменением сочетания факторов почвообразования при переходе от зоны арктических почв к подзоне арктотундровых почв, и менее выраженном при переходе от одной субарктической подзоны к другой. Об этом нам позволяет судить набор почв (то есть непосредственный результат сочетания факторов почвообразования), характерный для каждой зон и подзоны. Арктические почвы, почвы пятен и мерзлотных трещин, преобладающие в арктической зоне и занимающие относительно небольшие ареалы в силу своих особенностей, практически не встречаются в почвенном покрове Субарктики. Вместе с тем, большинство почв подзоны тундровых глеевых почв и подбуров Субарктики встречаются и в подзоне арктотундровых почв. Кроме того, в пределах арктической зоны широко распространены материковые льды, каменистые россыпи и пески, незатронутые процессами почвообразования – все вместе они могут ограничивать размеры почвен-

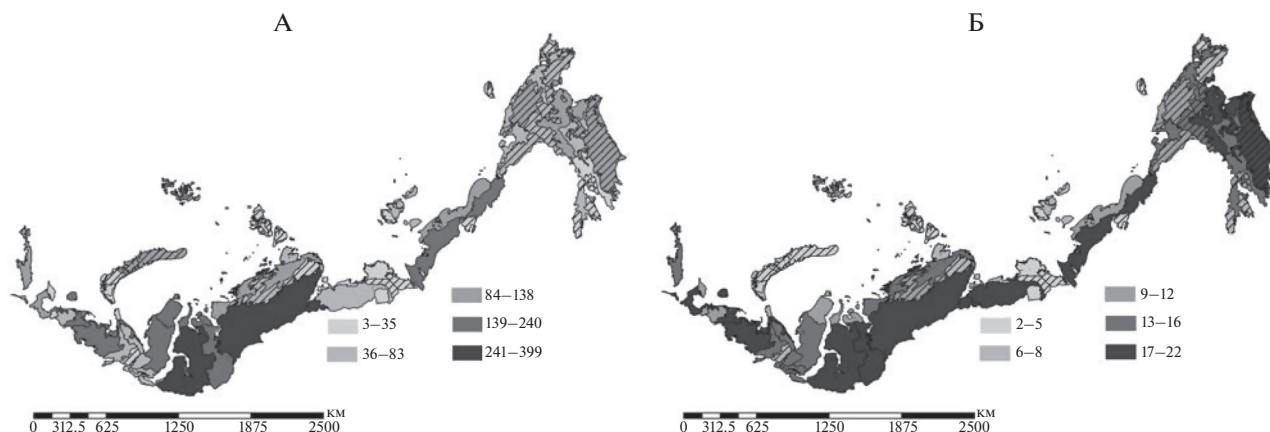


Рис. 3. Количество почвенных ареалов (А) и количество классификационных выделов (Б) в пределах округов. Здесь и на рис. 4–8 штриховкой показаны горные территории.

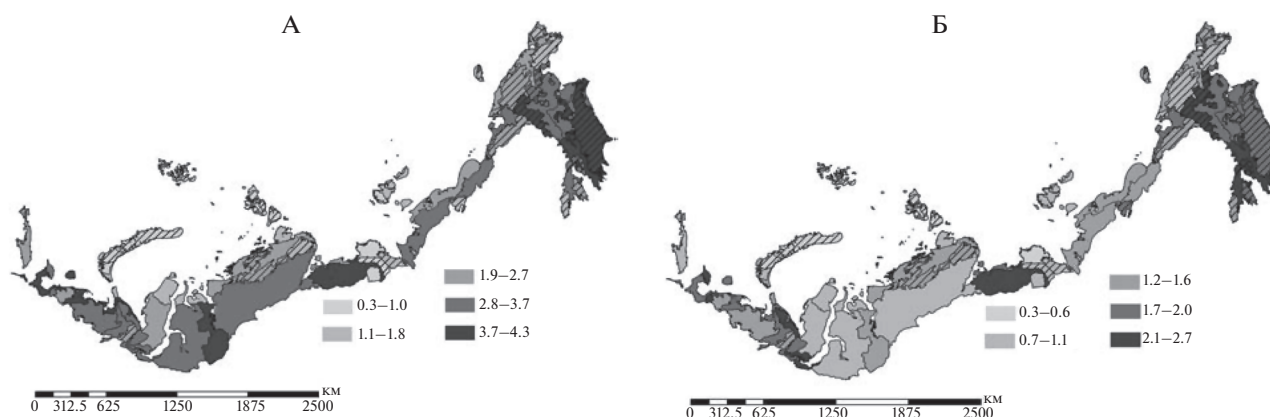


Рис. 4. Значения индекса Маргалефа (А) и Менхиника (Б) в пределах округов.

ных ареалов. Добавим, что в пределах Субарктики процессы почвообразования протекают дольше, в сравнении с Арктикой в силу большего возраста поверхности, что может обуславливать гомогенизацию почвенного покрова и формирование более крупных по размерам почвенных ареалов в Субарктике.

**Показатели почвенного разнообразия.** Значения индексов *богатства* растут при увеличении размеров почвенного округа. Количество почвенных ареалов и количество классификационных выделов статистически связаны с уровнем значимости 0.01. Равнинные территории, как правило, характеризуются большими значениями индексов, чем горные (рис. 3); максимальные значения индексов богатства наблюдаются в Тазовско-Гыданском, Печорско-Карском, Нижнеенисейском, Пясино-Хатангском округах; среди горных выделяется Апука-Хатыркинский округ. Наименьшее количество почвенных ареалов и классификационных выделов встречается в Тайгонском и Нахаянском горных округах.

*Индексы видового богатства* (Маргалефа и Менхиника) объединяют в себе информацию о количестве классификационных выделов почв и общем количестве выделенных на карте почвенных ареалов. При условии одинакового количества почвенных ареалов на двух территориях, индексы видового богатства будут выше там, где больше различных классификационных выделов. Значения индексов Маргалефа и Менхиника статистически связаны между собой с уровнем значимости 0.01 и не связаны с размерами почвенных округов. Максимальные значения индексов приходятся на Оленек-Анабарский и Пенжинский (равнинные), Пенжинский, Корякский, Анадырский (горные) округа; минимальные — островные территории (рис. 4).

Значения *индексов доминирования* (рис. 5) показывают степень преобладания на территории какого-либо одного почвенного классификационного выдела. Чем выше их значения, тем ниже разнообразие. Значения индексов Бергера-Паркера, Макинтоша, Симпсона статистически свя-

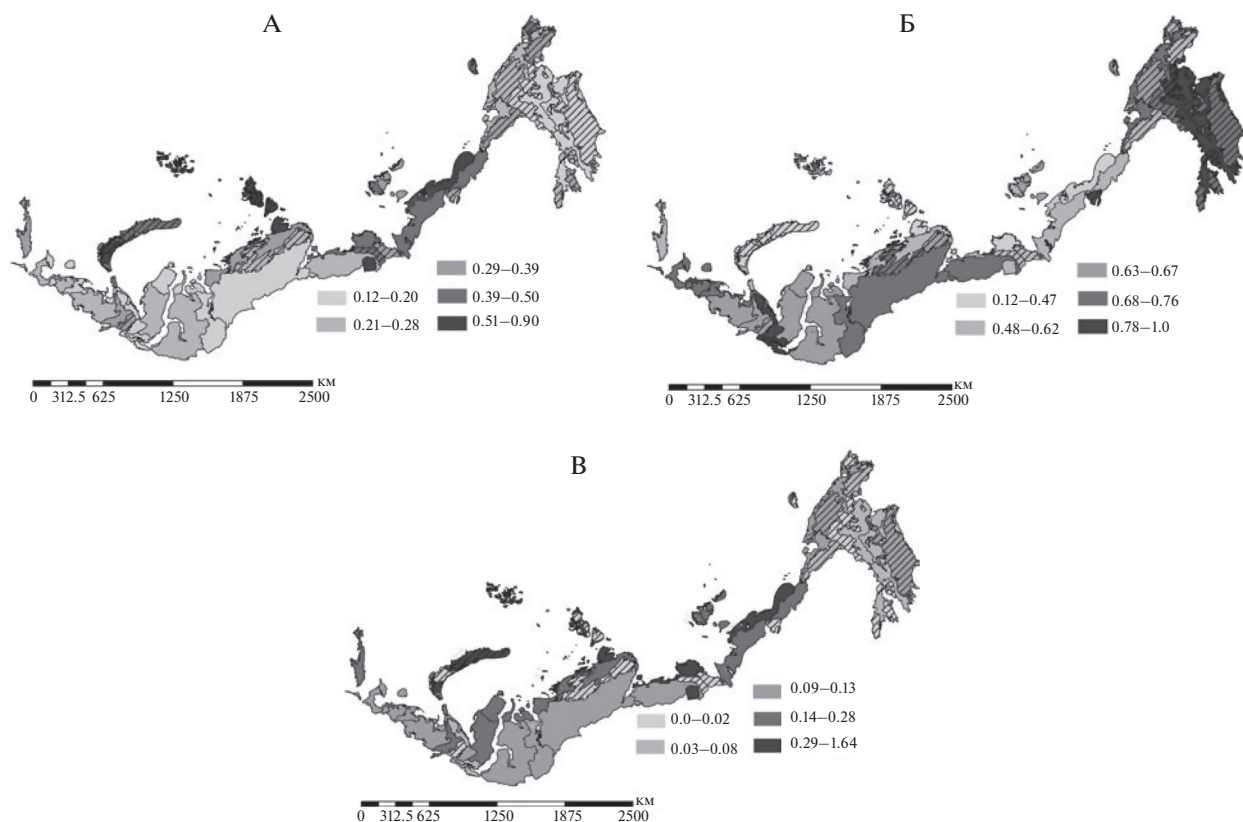


Рис. 5. Значения индекса Бергера-Паркера (А), Макинтоша (Б), Симпсона (В) в пределах округов.

заны между собой с уровнем значимости 0.01; при этом, связь между индексом Макинтоша и двумя другими рассчитанными обратно пропорциональна. Их значения не обнаруживают статистически значимую связь с размерами округов.

Несмотря на наличие статистических связей, полученные ряды почвенных округов (табл. 2), расположенные с учетом значения индексов, сильно отличаются друг от друга. Равнинные и горные округа достаточно хорошо отделяются друг от друга по значениям индекса Симпсона: чем больше значение индекса, тем больше вероятность отнесения исследуемого округа к горной территории. Средние и медианные значения индексов Макинтоша и Бергера-Паркера для горных и равнинных округов близки.

*Индексы сложности почвенного покрова* (индекс дробности и коэффициент сложности), в отличие от рассмотренных выше индексов, главным образом, характеризуют пространственный рисунок почвенного покрова и конфигурации почвенных ареалов (рис. 6) При их расчетах не учитывается информация о количестве различных классификационных выделов почв, представленных на карте. Значения этих показателей статистически связаны между собой с уровнем значимости 0.01 и не зависят от размеров почвенных округов. Максималь-

ные значения индекса дробности и коэффициент сложности приобретают на территории Восточно-Европейской равнины, минимальные – в пределах Верхоянского хребта.

В отличие от рассмотренных выше индексов, *индексы разнообразия* (Шеннона, нормированный индекс Шеннона, Джини-Симпсона) и *индекс латеральной дифференциации* одновременно учитывают количество выделенных на территории почвенных ареалов различных классификационных выделов и равномерность их распределения в пространстве (то есть в некоторой степени характеризуют пространственный рисунок). Чем больше на исследуемой территории почвенных ареалов и чем ближе их размеры между собой, тем больше значения индексов. Другими словами, при одинаковом количестве почвенных ареалов на двух разных участках значения индексов разнообразия будут выше там, где почвенные ареалы более соразмерны; в случае существенного неравенства размеров ареалов, доминирование одной почвы будет приводить к уменьшению значения индексов. Основное отличие между обозначенными индексами разнообразия заключается в придании веса (значимости) количеству выделенных ареалов и равномерности их распределения в пространстве при расчетах.

Таблица 2. Ряды почвенных округов в соответствии с их геометрическими особенностями и значениями индексов — от наибольших значений к наименьшим (сверху-вниз)

№ п/п	Критерий выделения рядов														суммарная оценка	
	площадь округа	длина почвенных границ в пределах округа	количество ареалов почв в пределах округа	количество классов-капционных выделов почв	значения индекса Маратфа	значения индекса Менхинника	значения индекса Бергера-Паркера	значения индекса Макинтоша	значения индекса Симпсона	значения коэффициента сложности	значения индекса дробности	значения индекса Шеннона	значения индекса Шеннона	значения индекса Ваното индекса		значения индекса Длжини-Симпсона
1	В4 I	В4 I	В3 IV	В3 IV	а6 гI	а6 гI	В7 I	а1 гIII	а4 гIV	В7 III	В2 I	В3 IV	В4 III	В2 I	В2 I	а6 гI
2	В3 IV	В3 IV	В4 I	В3 V	В4 II	В7 II	В2 VII	А3 I	а4 гIII	В2 I	В2 II	В4 I	В4 I	а5 гVII	В3 IV	В4 I
3	Б3 I	Б3 I	В3 II	В2 III	В4 II	В4 II	В6 II	А1 I	а5 гVII	В4 II	В1 I	В2 I	Б2 I	Б2 I	В4 I	а6 гI
4	В5 I	В3 V	В3 V	а6 гI	В3 V	В2 VIII	В4 I	А2 I	а6 гII	В2 III	В2 III	В3 II	а5 гIV	В3 II	В3 II	В2 III
5	а3 гI	В3 II	Б2 I	В4 I	В2 II	В2 II	Б2 I	а1 гIV	а4 гI	Б2 I	а6 гIV	В3 V	Б4 II	а6 гI	В3 V	а5 гIII
6	В3 V	В5 I	Б5 I	В2 V	В2 I	а5 гIII	а5 гIV	а1 гI	а3 гII	а6 гIII	Б4 II	В2 III	В7 III	В2 III	В6 II	а5 гIV
7	В4 II	В2 V	В2 III	В4 II	а5 гIII	а5 гIV	В3 V	Б3 VI	а5 гVI	В2 IV	В7 III	а6 гI	В2 IV	В6 II	Б2 I	В6 II
8	а6 гI	а3 гI	В2 V	Б5 I	В3 III	В3 III	В7 II	Б1 I	а6 гIII	В2 II	В2 IV	В2 V	а5 гII	В3 V	В2 I	В7 III
9	Б3 VI	В6 II	а6 гI	В6 II	В2 VII	В7 III	В2 II	а1 гII	а1 гIII	а1 гI	а6 гIII	В6 II	Б5 II	а5 гII	В4 II	Б5 II
10	В6 II	Б2 I	В1 I	В2 I	В6 II	В7 I	В3 I	А2 II	а4 гII	В3 II	А3 I	а5 гII	а6 гI	В6 I	В3 II	В3 IV
.....																
51	Б1 II	а4 гIV	А1 I	а4 гI	а4 гI	А1 I	А2 II	В3 I	а1 гII	а1 гII	В4 II	А2 II	А1 I	а3 гII	а1 гIV	а4 гI
52	а6 гIV	а5 гVI	а1 гIII	Б3 V	А1 I	Б1 I	а1 гI	а5 гIV	Б3 VI	А3 I	а4 гIII	а4 гI	Б3 V	Б4 I	Б4 I	Б4 I
53	а5 гVI	А2 II	а4 гI	Б4 I	а1 гI	А3 I	Б3 VI	В3 III	А2 II	Б3 III	Б3 V	Б3 III	а3 гII	А3 I	а4 гIV	а4 гIII
54	В2 II	а4 гIII	а5 гVII	а4 гIII	В4 III	Б2 I	В4 III	В7 III	В4 III	а3 гII	Б3 I	Б4 III	А2 II	А2 II	В4 III	А1 I
55	А2 II	В4 III	Б3 V	а4 гIV	Б3 III	а1 гIII	а1 гIV	В2 VII	а1 гI	Б3 V	Б3 III	Б4 I	Б3 VI	а4 гI	а4 гI	А2 II
56	а6 гIII	Б3 V	Б1 I	а1 гIV	Б1 I	Б3 III	Б1 I	В6 II	Б1 I	а4 гIII	В4 III	Б3 V	А3 I	а4 гIII	а4 гIII	а1 гIII
57	а4 гIII	а1 гIII	Б4 I	А2 II	а1 гII	А2 II	А2 I	В7 II	А2 I	а4 гIV	а3 гII	а4 гIII	Б3 III	Б3 V	Б3 V	Б3 V
58	Б1 I	а5 гVII	В4 III	а1 гIII	а1 гIII	а1 гIV	А3 I	В7 I	А3 I	а4 гI	а3 гI	а4 гIV	а1 гII	а4 гIV	А2 II	Б3 III
59	Б4 I	Б1 I	а4 гIII	Б1 I	А2 II	а1 гI	А1 I	а6 гII	А1 I	Б1 I	а4 гI	Б1 I	Б1 I	Б1 I	Б1 I	В4 III
60	а5 гVII	Б4 I	а4 гIV	В4 III	а1 гIV	а1 гII	а1 гIII	а4 гIV	Б3 II	а1 гIII	а4 гIV	а1 гIII	а1 гIII	а1 гIII	а1 гIII	Б1 I

Примечание. Расшифровка названий округов дана на рис. 1; ранжирование проведено для 60 округов, в таблице приведены округи с десятью наибольшими и десятью наименьшими значениями критериев.



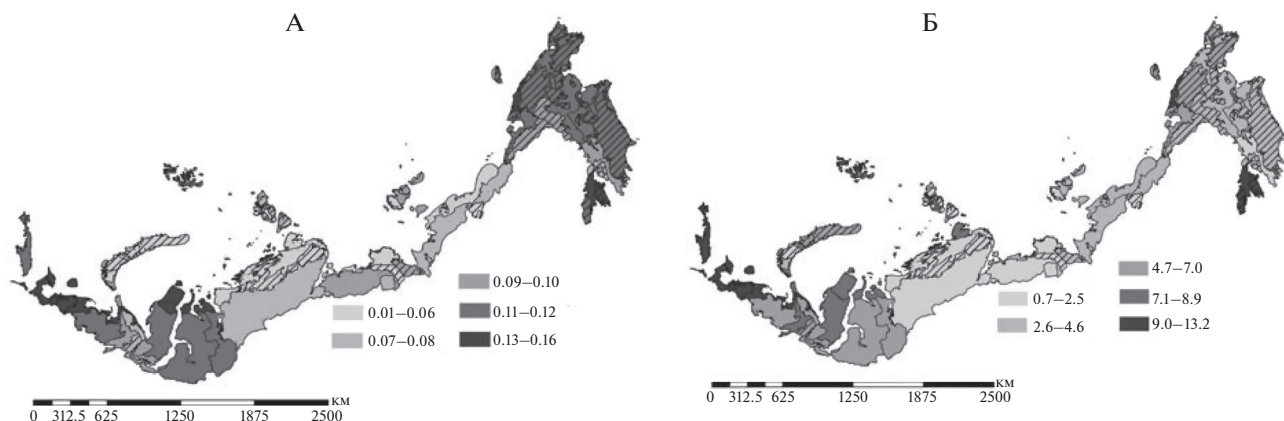


Рис. 6. Значения коэффициента дробности (А), индекса сложности (Б) в пределах округов.

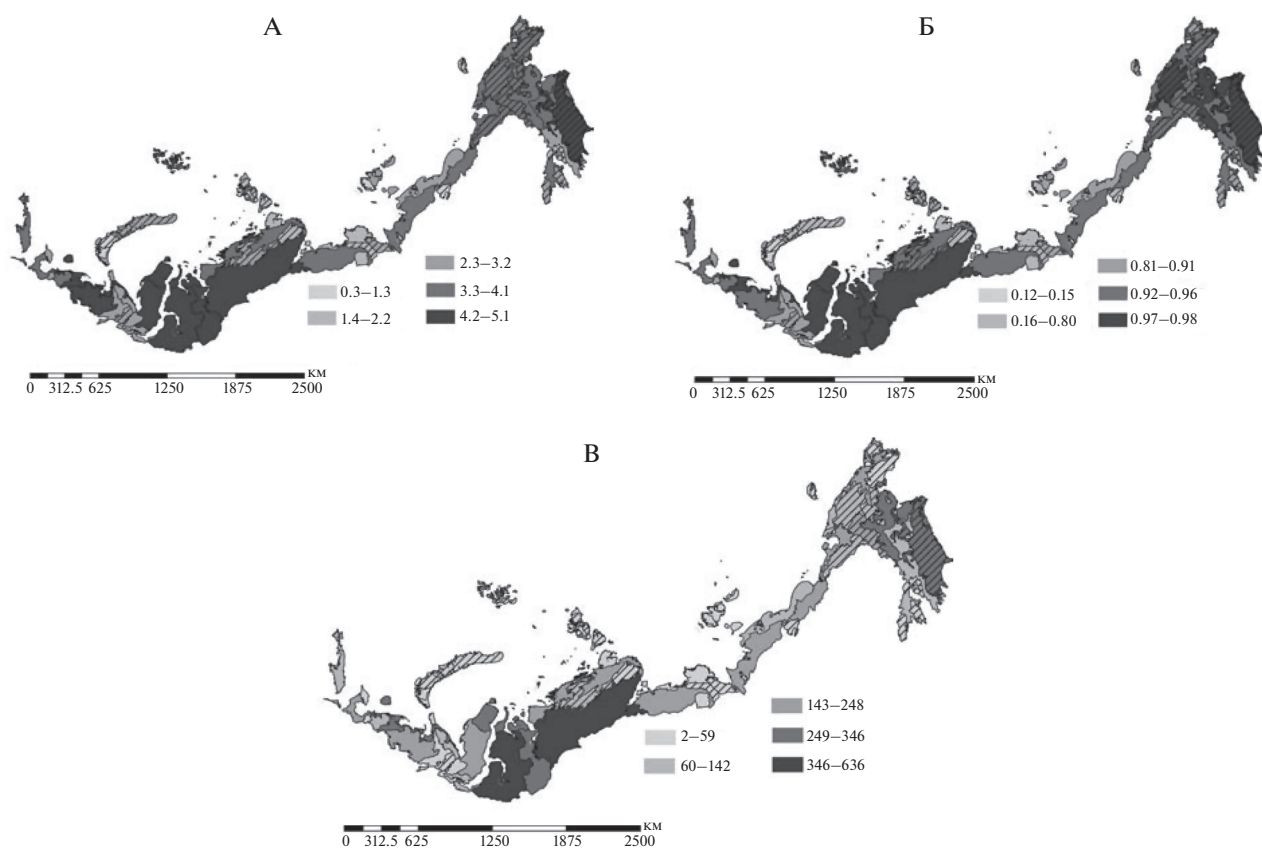


Рис. 7. Значения индекса Шеннона (А), Джини-Симпсона (Б), латеральной дифференциации (В) в пределах округов.

Все значения индексов разнообразия и индекс латеральной дифференциации увеличиваются при увеличении размеров территории и коррелируют между собой с уровнем значимости 0.01; для равнинных округов, в целом, характерны несколько более высокие значения индексов, чем для горных, однако статистически значимых различий между выборками нет. Максимальные значения характерны для округов Восточной и Западной

Сибири, Корякского и Чукотского нагорьев; минимальные — для островных территорий (рис. 7).

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона между всеми значениями индексов (богатства, видового богатства, доминирования, коэффициента сложности, индекса дробности, разнообразия, латеральной дифференциации) свидетельствует о значимой корреляции большого количества индексов между собой. Лидерами являются

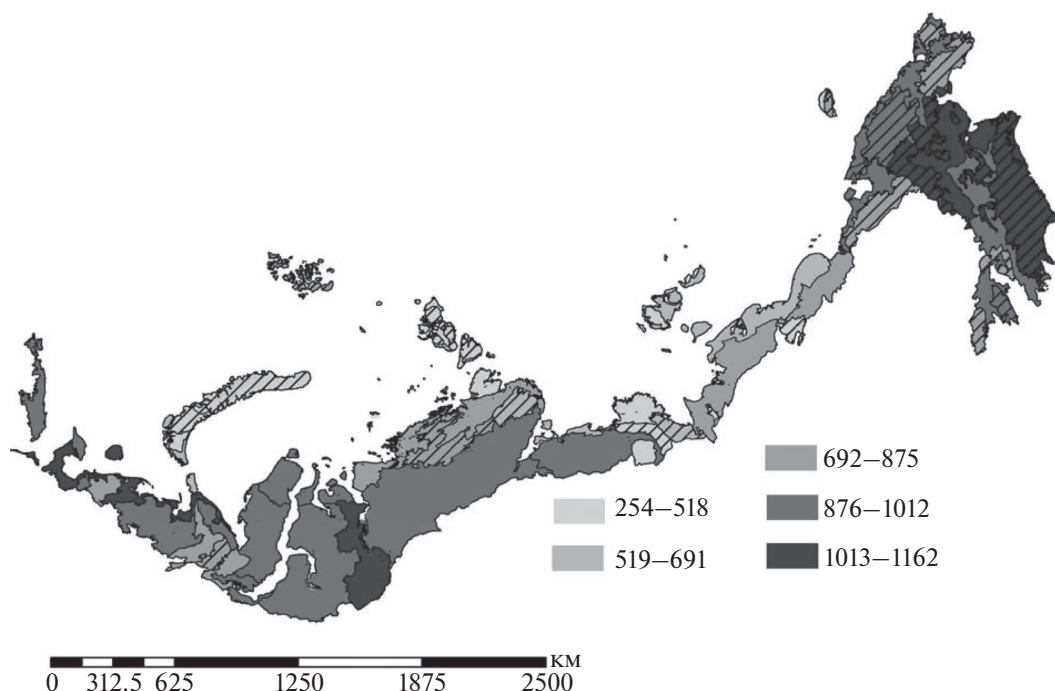


Рис. 8. Суммарная оценка почвенного разнообразия в пределах округов.

индекс Шеннона (связан со всеми за исключением индексов Менхиника и Макинтоша) и коэффициент сложности (связан со всеми за исключением нормированного индекса Шеннона и индекса Симпсона). Для индекса Симпсона характерно минимальное количество статистически значимых связей с другими индексами; они обнаружены с нормированным индексом Шеннона, индексами Маргалефа, Менхиника, Бергера-Паркера и Макинтоша. Корреляция индексов объясняется использованием при их расчетах одних и тех же данных о почвенном покрове (количестве почвенных ареалов, их размеров, числе классификационных выделов почв); однако наличие статистически значимых связей между индексами не обуславливает одинаковое место почвенных округов в ряду от максимальных до минимальных значений рассчитанных индексов (табл. 2).

На основании проведенной суммарной оценки (рис. 8) выявлено, что максимальным почвенным разнообразием среди горных округов характеризуются Корякский, Анадырский и Пекульнейско-Искатеньский округа, среди равнинных – Печеро-Карский, Мезенско-Чешский и Нижнеенисейский округа. Наименьшие значения приходятся на островные территории: Южно-Новоземельские равнинные и горные округа.

Значения индексов Шеннона, Менхиника, дробности, коэффициента сложности и суммарной оценки подчиняются нормальному закону распределения (в отличие от других рассчитан-

ных показателей), что позволяет провести дискриминантный анализ и определить степень достоверности различий средних значений между выборками почв, формирующихся в разных геоморфологических и климатических условиях. Согласно полученным данным, при переходе от зоны арктических почв к почвам субарктической подзоны происходит достоверное увеличение значений индексов Менхиника, Шеннона, суммарной оценки, то есть почвенного разнообразия. Почвы арктической зоны и подзоны арктикотундровых почв достоверно отличаются друг от друга по значениям индексов Менхиника, Шеннона, коэффициентов сложности, суммарной оценки. Сравнение средних значений по другим выборкам, в том числе горных и равнинных территорий, не дают основания достоверно различать их между собой. Можно предположить, что разнообразие компонентов почвенного покрова равнинных и горных территорий Арктики и Субарктики сходно в силу экстремальных условий почвообразования в данном регионе, а именно: низких температур, непродолжительного вегетационного периода, присутствия каменистых россыпей и материковых льдов как на равнинных, так и на горных участках. Вместе с тем анализ выделенных рядов почв от максимальных значений к минимальным (табл. 2) для всех индексов (не только Шеннона, Менхиника, дробности, коэффициента сложности и суммарной оценки, подчиняющихся нормальному закону распределения) показывает, что в первых десяти

строчках встречаются преимущественно равнинные округа (обычно 7–9 из 10), в последних десяти количество равнинных и горных округов приблизительно одинаково. Исключение составляют значения индекса разнообразия Симпсона: максимальные значения характерны только для горных территорий, минимальные – для равнинных.

Полученные результаты по количественной оценке почвенного разнообразия в целом соответствуют опубликованным ранее данным [1, 8, 18, 20]: почвенный покров Арктики и Субарктики характеризуется невысоким уровнем разнообразия. Вместе с тем проведенные нами расчеты для территорий более низкого таксономического ранга показали, что почвенный покров Арктики и Субарктики является менее однородным с точки зрения пространственного разнообразия его компонентов, чем это было показано в упомянутых работах [1, 8, 18, 20].

Сравнение значений индекса Шеннона (рис. 7А и рис. 7 из [20]), рассчитанных на основе разных картографических данных – почвенной карты РСФСР и почвенной карты мира ФАО, – показывает, что некоторые территории могут характеризоваться как высокими, так и низкими значениями индекса, в зависимости от выбора картографического материала для расчета. Примером могут являться почвенный покров полуостровов Ямал и Гыдан, Средне-Сибирской низменности и др. Существенно более высокие значения индекса Шеннона для обозначенных территорий, полученные при использовании почвенной карты РСФСР в сравнении с почвенной картой мира ФАО, обусловлены тем, что на последней почвенный покров Арктики и Субарктики показан значительно проще и однороднее: выделены крупные ареалы Cryosols (преимущественно Turbic), Regosols (преимущественно Gelic), Gleysols (преимущественно Gelic) и Eutric, Dystric, и Gelic Histosols.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие методические подходы к оценке почвенного разнообразия позволяют количественно охарактеризовать почвенный покров Арктики и Субарктики с позиций классификационного разнообразия, количества почвенных ареалов, степени выраженности доминирования какого-либо классификационного выдела, сложности пространственного рисунка. Одновременный учет классификационного разнообразия и пространственного рисунка почвенного покрова при расчете индекса Шеннона, а также подчинение его значений нормальному закону делает использование последнего при количественной оценке почвенного разнообразия наиболее эффективным.

Почвенные округа Арктики и Субарктики России характеризуются различным уровнем почвенного разнообразия. Оно увеличивается при переходе от зоны арктических почв к подзоне аркто-тундровых почв Субарктики и сопровождается увеличением размеров почвенных ареалов. Максимальные показатели почвенного разнообразия наблюдаются на территории Печерско-Карского, Мезенско-Чешского и Нижнеенисейского равнинных округов; Корякского, Анадырского и Пекульнейско-Искатеньского горных округов. Южно-новоземельские горные и равнинные округа характеризуются наименьшими значениями показателей почвенного разнообразия.

Анализ рядов почвенных округов, выстроенных от наибольших значений индексов к наименьшим, показывает, что в лидирующую группу (первые 10 значений) попадают преимущественно равнинные округа. Такая особенность характерна для всех индексов, за исключением индекса Симпсона, где лидирующая группа полностью представлена горными округами. Вместе с тем, дискриминантный анализ, выполненный для значений индексов, подчиняющихся нормальному закону (Шеннона, Менхеника, дробности, коэффициента сложности) не позволил выявить достоверных различий между средними значениями показателей горных и равнинных округов.

Для почвенного покрова Арктики и Субарктики характерно доминирование небольшого количества почв при редкой встречаемости всех остальных классификационных выделов. Наиболее часто встречающимися почвами в пределах равнинных территорий являются тундровые глеевые торфянистые и торфяные, торфянисто и торфяно-глеевые болотные и почвы пятен; в горах – горные примитивные почвы и тундровые подбуры. При этом максимальные площади в исследуемом регионе заняты аркто-тундровыми и тундровыми слабооглееными гумусными почвами.

**Благодарность.** Работа выполнена за счет гранта РФФИ № 16-35-60056 мол\_a\_дк.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алябина И.О.* Картографическая оценка разнообразия почв России // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2018. № 1. С. 8–15.
2. *Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера. М.: ГЕОС, 2010. 421с.
3. *Добровольский Г.В., Урусевская И.С., Розов Н.Н.* Карта почвенно-географического районирования СССР для высшей школы // Новые типы карт. Методы их создания. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. С. 74–85.
4. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [Электронный ресурс]: Электрон. картограф. дан. Режим доступа: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1DB.html>, свободный.

5. Иванов А.Л., Столбовой В.С., Савин И.Ю. Почвенный ресурс Арктики // Докл. Академии Наук. 2016. Т. 466. № 3. С. 350–352.
6. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1 : 2500000 / Под ред.: Г.В. Добровольского, И.С. Урусевской. М., 2013.
7. Национальный атлас Арктики / Глав. ред. Н.С. Касимов М.: Роскартография, 2017. 496 с.
8. Национальный атлас почв Российской Федерации / Глав. ред. С.А. Шоба М.: Астрель, 2011. 632 с.
9. Почвенная карта РСФСР. Масштаб 1 : 2500000 / Под ред. В.М. Фридланда. М.: ГУГК, 1988 (скорректированная цифровая версия, 2007).
10. Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Алещенко Г.М. Разнообразие ландшафта и методы его измерения // География и мониторинг биоразнообразия. М.: НУМЦ, 2002. С. 76–178.
11. Смирнова М.А., Геннадиев А.Н. Количественная оценка почвенного разнообразия: теория и методы исследования // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 4. С. 3–11.
12. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 424 с.
13. ACIA, Impacts of a warming Arctic: Arctic climate impact assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 141 p.
14. Cooper E.J. Warmer shorter winters disrupt Arctic terrestrial ecosystems // Annual Review Ecology, Evolution and Systematics. 2015. V. 45. P. 271–295. doi 10.1146/annurev-ecolsys-120213-091620
15. Goryachkin S.V., Blumel H.P., Beyer L., Campbell I. et al. Similarities and Differences in Arctic and Antarctic Soil Zones / Ed.: J.M. Kimble. Cryosols. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. P. 49–71.
16. Huston M.A. Biological Diversity. The coexistence of species on changing landscapes. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994. 685 p.
17. Ibanez J.J., Caniego J., San Jose F., Carrera C. Pedodiversity-area relationships for islands // Ecological modeling. 2005. V. 182. P. 257–269. doi 10.1016/j.ecolmodel.2004.04.005
18. Ibanez J.J., De-Alba S., Lobo A., Zucarello V. Pedodiversity and global soil patterns at coarse scales // Geoderma. 1988. V. 83. P. 171–192. doi 10.1016/S0016-7061(97)00147-X
19. Ibanez J.J., Vargas R.J., Vazquez-Hoehne A. Pedodiversity State of the Art and Future Challenges // Pedodiversity. London: CRC press, 2013. P. 1–28.
20. Minasny B., Mc Bratney A.B., Hartemink A.A. Global pedodiversity, taxonomic distance and the World reference base // Geoderma. 2010. V. 155. P. 132–139. doi 10.1016/j.geoderma.2009.04.024
21. Phillips J.D. Marion Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas // Geoderma. 2005. V. 124. P. 73–89. doi 10.1016/j.geoderma.2004.04.004
22. Ricotta C. Through the jungle of biological diversity // Acta Biotheoretica. 2005. V. 53. P. 29–38.
23. Tarnocai C. Arctic Permafrost Soils / Ed.: R. Margesin. Permafrost Soils. Soil Biology. 2009. V. 16. Springer, Berlin, Heidelberg. P. 3–16.
24. Toomanian N., Jalalian A., Khademi H., Eghbal M.K., Papritz A. Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, Central Iran // Geomorphology. 2006. V. 81. № 3–4. P. 376–393. doi 10.1016/j.geomorph.2006.04.016

## Quantitative Assessment of Pedodiversity in the Russian Arctic and Subarctic (by Cartographic Data)

M. A. Smirnova<sup>a,\*</sup> and A. N. Gennadiev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

\*e-mail: summerija@yandex.ru

A quantitative assessment of the diversity of the soil cover components of the Arctic and Subarctic as shown on the Soil Map of Russian Federation, scale 1 : 2.5 M. Soil units of this map were combined with the mapping units on the map of soil-ecological zoning of the same scale, namely, soil districts (plains and mountains). For each soil district (total 60), average, minimum and maximum sizes of soil polygons, richness indices (total number of polygons and number of taxonomic units) were calculated, as well as species richness (Margaref, Menchinique), domination indices (Berger-Parker, Mackintosh, Simpson), complexity of the soil cover (index of fractionality, complexity factor), diversity indices (Shannon, normalized Shannon index, Gini-Simpson), lateral differentiation, and a total score was derived by accounting the values of all calculated indices. The following quantitative characteristics of the soil cover were used to calculate the indices: the number of soil polygons, soil taxonomic groups, the length of boundaries, the area of polygons (including the average and maximum values) and their ratio. The soil diversity increases from the Arctic soil zone to the Subarctic arctic-tundra subzone and is accompanied by an increase in the areas of soil polygons. Pechorsko-Karskiy, Mezensko – Cheshskiy and Nizhneeniseyskiy plain soil districts, Koryakskiy, Anadyrskiy and Pekulneysko-Iskatenskiy mountain soil districts are characterized by maximum soil diversity, while the South-Novaya Zemlya mountain and plain soil districts – by the lowest one.

**Keywords:** soil cover pattern, arctic soils (Haplic Cryosols), arctic-tundra soils (Haplic Cryosols), tundra gley soils (Histic Cryosols), pedodiversity